

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA PETROLERA



**“ANÁLISIS PREDICTIVO DE RIESGOS EN LA PLANTA DE BIO DIÉSEL HVO DE LA
REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL, APLICANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL
COMPUTACIONAL”**

EGRESADA: MARGARITA DEL ROSARIO NINA SANCHEZ

TUTOR: Msc. Ing. MARIO DAZA BLANCO

La Paz Bolivia
2023



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

AGRADECIMIENTOS

A Dios que me dio el aliento de vida y actúa cada día de manera sobrenatural en mi vida.

A mi madre Rosario Sánchez quien me empujó a tomar riesgos en la vida, me enseñó a volar alto y a confiar en mí misma además me enseñó el valor de la familia y mi valor como persona.

A mi padre Valentín Nina que siempre me ha brindado su apoyo moral y económico incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales de académicos.

A mis hermanos mayores Gabriel y Marcelo y sus esposas, que con su cariño y sus experiencias me han impulsado a perseguir mis metas.

A mi hermana menor Betty y a las nuevas generaciones Uriel, Camilo y Videl que me inspiran a continuar creciendo y progresando en busca de una vida mejor.

Agradezco profundamente a mi casa de estudios UMSA que me ha exigido tanto, pero al mismo tiempo me ha permitido obtener mi tan ansiado título profesional. Agradezco al plantel de docentes por su paciencia y dedicación con los alumnos de la carrera de Ingeniería Petrolera que me ha dado buenos amigos, cómplices y colegas con quienes compartí las mejores experiencias de mi juventud.

CONTENIDO GENERAL

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ACRÓNIMOS

RESUMEN EJECUTIVO

CAPITULO I GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. ANTECEDENTES	1
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3.1. Identificación del Problema	3
1.3.2. Formulación del Problema	4
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos Específicos	4
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.5.1. Justificación Técnica	5
1.5.1. Justificación Social.....	5
1.5.2. Justificación Ambiental.....	5
1.5.3. Justificación Económica.....	5
1.5.4. Justificación Teórica	6
1.6. ALCANCE	6
1.6.1. Alcance Temático.....	6

1.6.2. Alcance Geográfico.....	6
1.6.3. Alcance Temporal	6
1.7. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	6
1.7.1. Paradigma de investigación científica.....	6
1.7.2. Enfoque de la investigación científica.	7
1.7.3. Tipo de investigación	7
1.7.4. Diseño de la investigación científica.....	7
1.7.4.1. Método deductivo.....	7
1.7.4.2. Método lógico deductivo.....	7
1.7.4.3. Método descriptivo.....	7

CAPÍTULO II

PROCESO DE OBTENCIÓN DE DIÉSEL RENOVABLE A PARTIR DEL HIDROTRATAMIENTO DE ACEITES VEGETALES

2.1. BIODIÉSEL	8
2.1.1 Propiedades del diésel verde	8
2.2. PROCESOS DE OBTENCIÓN DEL BIODIESEL.....	9
2.2.1. Transesterificación (Proceso para Obtener Biodiésel Tecnología Fame)	10
2.2.1.1. Transesterificación utilizando bases.....	11
2.2.1.2. Transesterificación con catalizador ácido.	11
2.2.2. Hidrotratamiento Catalítico (HDT - Proceso para obtener diesel renovable tecnología HVO).....	11
2.3. PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL DIESEL VERDE.....	12
2.3.1. Reacciones Principales en el hidrotratamiento catalítico para la producción de diesel verde	13
2.3.2. Catalizadores y soportes para el hidrotratamiento del aceite vegetal.....	17
2.4. RIESGOS EN PROCESOS PETROQUÍMICOS	18

2.4.1. Tipología de accidentes	18
2.4.1.1. Fugas: escapes y derrames	18
2.4.1.2. Incendios	19
2.4.1.3. Explosiones	20
2.5. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS ENFOCADO EN PLANTAS QUÍMICAS	24
2.5.1. Términos y definiciones	24
2.5.1.1. Accidente de trabajo.....	24
2.5.1.2. Actividad rutinaria.....	24
2.5.1.3. Actividad no rutinaria.....	24
2.5.1.4. Análisis del riesgo.....	24
2.5.1.5. Consecuencia.....	25
2.5.1.6. Elemento de protección personal (EPP).....	25
2.5.1.7. Equipo de Protección Personal.....	25
2.5.1.8. Evaluación del riesgo.....	25
2.5.1.9. Exposición.....	25
2.5.1.10. Identificación del peligro.....	25
2.5.1.11. Incidente.....	25
2.5.1.12. Medida (s) de control.....	25
2.5.1.13. Nivel de consecuencia (NC).....	25
2.5.1.14. Nivel de deficiencia (ND).....	26
2.5.1.15. Nivel de exposición (NE).....	26
2.5.1.16. Nivel de riesgo.....	26
2.5.1.17. Peligro.....	26
2.5.1.18. Personal expuesto.....	26
2.5.1.19. Probabilidad.....	26

2.5.1.20. Riesgo.....	26
2.5.1.21. Riesgo aceptable.....	26
2.5.1.22. Valoración de los riesgos.	26
2.5.1.23. Valor límite permisible (VLP).	26
2.5.2. Métodos y técnicas para el análisis de riesgos	26
2.5.2.1. Estudios cualitativos.....	27
2.5.2.2. Estudios semicuantitativos	27
2.5.2.3. Estudios cuantitativos.....	27

CAPÍTULO III

TEORÍA DE BIG DATA Y SU APLICACIÓN EN EL ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGO EN EL PROCESO HVO

3.1. TEORÍA DE BIG DATA.....	28
3.2. DEFINICIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL	28
3.3. EL APRENDIZAJE	29
3.4. EL ERROR Y LOS PROBLEMAS DE AJUSTE	30
3.5. ETAPAS DE UN PROYECTO DE MACHINE LEARNING	31
3.6. MINERÍA DE DATOS	33
3.7. ALGORITMOS DE MACHINE LEARNING.....	33

CAPÍTULO IV

INGENIERÍA DEL PROYECTO

4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE HIDROTRATAMIENTO DE ACEITES VEGETALES.....	35
4.1.1. Tecnologías para el proceso HVO	35
4.1.1.1. Materias primas	35
4.1.1.2. Pre Tratamiento de la materia prima	37
4.1.1.3. Desoxigenación de aceites vegetales.....	38

4.1.1.4. Condiciones del reactor	38
4.1.1.5. Tipo de reactor	38
4.1.1.6. Isomerización	39
4.1.2. Diseño del proceso	39
4.1.2.1. Simulación del Hidrotratamiento de aceite de palma.....	40
4.1.2.1.1. Programación del proceso de hidrotratamiento	41
4.1.2.1.1. 1. Condiciones operativas del sector hidrotratamiento	41
4.1.2.1.1. 2. Condiciones operativas del sector isomerización.....	42
4.1.2.2. Procedimiento de la programación.....	42
4.1.2.3. Parametros obtenidos.....	48
4.2. IDENTIFICACION Y EVALUACION DE RIESGOS EN EL PROCESO DE HIDROTRATAMIENTO DE ACEITES VEGETALES.....	48
4.2.1. Análisis cualitativo de riesgos mediante HAZOP.....	49
4.2.1.1. Aplicación del método al Nodo 1: suministro de gas natural.....	49
4.2.1.2. Aplicación del método al Nodo 2: reactor de hidrotratamiento y separador.....	55
4.2.1.3. Aplicación del método al Nodo 3: reactor isomerización y horno.....	59
4.2.2. Aplicación del método al Nodo 4: suministro de hidrogeno.....	64
4.2.2.1. Análisis cuantitativo de riesgos con Matrices IPERC.....	69
4.3. MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR LAS CONSECUENCIAS DE UNA EXPLOSION BLEVE.....	81
4.3.1. Escenario BLEVE.....	81
4.3.2. Escenario INCENDIO FLASH.....	85
4.4. MODELO PREDICTIVO CON MACHINE LEARNING.....	95
4.4.1 Determinación de las variables y datos de partida.....	95
4.4.1.1 Importar librerías y bases de datos.....	97
4.4.4.2. Implementación y validación del modelo predictivo.....	99

4.5.	DISEÑO DE UN PLAN DE MITIGACION DE RIESGOS.....	100
4.5.1.	Datos generales de la planta HVO.....	100
4.5.2	Descripcion del centro de trabajo.....	101
4.5.3.	Nivel de responsabilidades.....	102
4.5.4.	Programa de prevención de riesgos.....	105
4.5.4.1.	Política de prevención de riesgos.....	105
4.5.4.2.	Identificación y evaluación de riesgos.....	106
4.5.4.3.	Identificación de disposiciones Legales.....	107
4.5.4.4.	Programa de seguridad y salud ocupacional	108
4.5.4.5.	Programa de entrenamiento y capacitación.....	108
4.5.4.6.	Procedimientos de control operacional.....	105
4.5.4.7.	Planes de contingencia y procedimientos de emergencia.....	106
4.5.4.8.	Plan de emergencias médicas	120
4.5.4.9.	Preparación de simulacros	121
4.5.5.	Control del desempeño y registros	123
4.5.6.	Investigación de Incidentes	123
4.5.7.	Auditorias	123

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.	CONCLUSIONES.....	124
5.2.	RECOMENDACIONES.....	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Tecnologías del biodiésel.....	10
Figura 2.2. Pasos de la transesterificación de triglicéridos con alcohol.....	10
Figura 2.3. Hidroprocesamiento para la obtención de diésel verde.	13
Figura 2.4. Trayectoria de reacción propuesta para el hidrotratamiento de triglicéridos.....	14
Figura 2.5. Esquema de reacción de la desoxigenación del ácido oleico.....	15
Figura 2.6. Mecanismo de hidrodeshidrogenación de ácidos carboxílicos	16
Figura 2.7. Esquema representativo del mecanismo de desintegración e isomerización.....	17
Figura 2.8. Composición de los catalizadores de hidrotratamiento.	17
Figura 3.1. Representación del aprendizaje utilizando machine learning	30
Figura 3.2. Etapas Genéricas para llevar a cabo un proyecto de machine learning	31
Figura 4.1. Diagrama de bloques para el proceso NExBTL®	35
Figura 4.2. Componentes del proceso de hidrotratamiento en la simulación	43
Figura 4.3. Balance estequiométrico	44
Figura 4.4. Reacciones de hidrogenación.....	44
Figura 4.5. Composición de los productos del reactor de isomerización.....	45
Figura 4.6. Cálculo de número de platos de la torre de destilación.....	45
Figura 4.7. Composición de los productos finales a la salida de la torre de destilación.....	46
Figura 4.8. Proceso completo para la obtención de Diesel verde.....	47
Figura 4.9. Variación de la temperatura en las etapas de conversión.....	48
Figura 4.10. Diagrama de flujo del reformado de vapor con agua.....	50
Figura 4.11. Diagrama de flujo del área operativa de separación de fluidos.....	55
Figura 4.12. Diagrama de flujo del área operativa de separación de fluidos.....	60
Figura 4.13. Diagrama de flujo de la unidad de aminas.....	64

Figura 4.14. Factor de vista para superficies emisoras plana64

Figura 4.15. Parámetros del entrenamiento de la red neuronal.....98

Figura 4.16. Grafica etapa vs. error cuadrático medio.....99

Figura 4.17. Análisis de correlación entre las variables.....99

Figura 4.18. Orden de actuación.....103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Propiedades del diésel verde y los métodos empleados para su determinación....	9
Tabla 2.2. Clasificación de las explosiones en sistemas cerrados (CVCE) y abiertos.....	21
Tabla 4.1 Componentes y fracciones molares del aceite de palma.....	37
Tabla 4.2. Parámetros de operación del reactor de hidrotratamiento.....	42
Tabla 4.3. Alimentación de aceite de palma e hidrogeno al reactor de hidrotratamiento....	42
Tabla 4.4. Parámetros de operación del reactor de isomerización.....	42
Tabla 4.5. Condiciones de operación de la torre destiladora.....	46
Tabla 4.6. Determinación del nivel de deficiencia.....	70
Tabla 4.7. Determinación del nivel de exposición.....	70
Tabla 4.8. Determinación del nivel de probabilidad.....	71
Tabla 4.9. Significado de los diferentes niveles de probabilidad.....	71
Tabla 4.10. Determinación del nivel de consecuencia.....	71
Tabla 4.11. Determinación del nivel del riesgo.....	72
Tabla 4.12. Significado del nivel del riesgo.....	72
Tabla 4.13. Aceptabilidad del riesgo.....	73
Tabla 4.14. Matriz de identificación de peligros y valoración de riesgos en el proceso HVO	74
Tabla 4.15. Datos termodinámicos del Propano.....	82
Tabla 4.16. Determinación de la geometría de la flama cada 3	89
Tabla 4.17. Distancia entre flama y receptor a cada 3 segundos	91
Tabla 4.18. Variables para la obtención del factor de vista a cada 3 segundos.....	92
Tabla 4.19. Cálculo del Coeficiente de atenuación	93
Tabla 4.20. Cálculo de la radiación	94
Tabla 4.21. Base de datos para la programación machine learning.....	97

ACRÓNIMOS

ANH: Agencia Nacional de Hidrocarburos

ABI: Agencia Boliviana de Información

ASTM: American Society for Testing and Material Standard

BLEVE: Explosión de vapor de expansión de líquido hirviendo (boiling liquid expansion vapour explosion)

CVCE: Explosiones iniciadoras en sistemas cerrados

ENI: Corporación Nacional de Hidrocarburos

EPP: Equipo De Protección Personal

IA: Inteligencia Artificial

IBCE: Instituto Boliviano de Comercio Exterior

IPERC: Identificación de Peligros y la Evaluación de Riesgos y Controles

GEB: Guillermo Elder Bell

GTC: Guía Técnica Colombiana

HAZOP Análisis Funcional de Operabilidad

HDT: Hidrotratamiento Catalítico

HVO: Aceite Vegetal Hidrotratado (hydrotreated vegetable oil)

LSHV: Velocidad Espacial Horaria Del Líquido

SAPO: Silico alumino fosfato

TNT: Trinitrotolueno

UOP: Universal Oil Products

UVCE: Explosión de nube de vapor no confinada (unconfined vapour cloud explosion)

YPFB: Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizaron análisis de riesgos con dos enfoques: el primero, cualitativo a través de un “Análisis de riesgos y operabilidad” y el segundo, cuantitativo mediante la elaboración de matrices de riesgos técnicamente conocidas como matrices de “Identificación de peligros y evaluación de riesgos y controles” en la futura planta de hidrotratamiento de aceites vegetales instalada en la refinería Guillermo Elder Bell. Se aplicó la teoría del “aprendizaje automático” del cual se obtuvo un programa capaz de predecir las consecuencias en circunstancias específicas. Para alcanzar el objetivo del presente proyecto se usaron datos de autores expertos en plantas con tecnología HVO, los cuales se usaron para la simulación del proceso de hidrotratamiento mediante el software Aspen Plus v11. En base al diagrama de flujo obtenido por la simulación, se identificaron los nodos y las desviaciones de las variables del proceso y fueron usados para el análisis de operabilidad, además que, se determinó las áreas operativas del proceso, líneas de flujo y el número de equipos involucrados en el proceso y a partir de esta información se construyeron las matrices de riesgos. Finalmente, se describió dos modelos matemáticos para determinar las consecuencias de una explosión BLEVE producida por una fuga de propano verde en el reactor de isomerización y una explosión producida por una nube de hidrógeno gaseoso. Queda propuesto el “Plan de mitigación de riesgos en la planta HVO” Para concluir en este trabajo, se describió primero: la parte operativa del proceso de hidrotratamiento del aceite de palma, segundo: el análisis de riesgos cualitativo y cuantitativo, tercero: programa para la predicción de consecuencias para casos específico de explosiones y cuarto: el diseño del plan de mitigación de riesgos.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Es un hecho Bolivia destina 250 millones de dólares para su primera planta de producción de diésel renovable.

Al ser un bien producido en territorio nacional, se reduciría la dependencia en las importaciones del carburante de terceros países, lo que supondría al Estado un ahorro de alrededor de 400 millones de dólares.

Según publica El Deber, el gobierno calcula que el proyecto permitirá producir hasta 9000 barriles de diésel renovable que contribuirán a reducir la contaminación del mercado del combustible en un 80 %. El hidrocarburo se produce partir de aceites vegetales hidrogenados (HVO, por sus siglas en inglés), aceites usados de cocina y grasas animales, que ascenderán a unas 450 000 toneladas por año.

Ubicado en la refinería Guillermo Elder Bell en el departamento de Santa Cruz, esta planta solo será el primero de varios proyectos que el Gobierno busca establecer en el territorio occidental del país, de donde se puede extraer la materia prima para la producción de diésel renovable, informa La Razón.

El proyecto tiene como objetivo discutir un enfoque de ingeniería impulsado por el riesgo para respaldar el desarrollo de pronósticos y sistemas de gestión en la seguridad industrial como una planificación previa a la construcción de la planta de biodiesel dentro de la refinería Guillermo Elder Bell.

A través de casos seleccionados, se desea realizar un análisis de riesgos utilizando los potenciales tecnológicos actuales disponibles desde el pronóstico y la gestión de la salud, y su ingeniería en contextos industriales reales que hacen frente a las limitaciones y oportunidades de la planificación y control de riesgos y la infraestructura de procesos existente en la tecnología de hidrotratamiento de aceites vegetales para la obtención de biodiesel.

1.2. ANTECEDENTES

Los autores Alvarez-Majmuto et. al. (2022), en México y Canadá realizaron el estudio “Modelado y simulación de un reactor industrial multilecho para hidroprocesamiento de Diesel Renovable”. En este estudio se analizó el comportamiento de una unidad de hidroprocesamiento de aceite vegetal en un ambiente comercial a través de técnicas de modelado y simulación. Para describir el sistema trifásico (gas-líquido-sólido) de manera detallada, se construyó un modelo de reactor a escala comercial que tiene múltiples lechos de catalizador e inyecciones de gas de extinción entre lechos dentro del cual se

estudió la transferencia de calor y masa entre fases, la respuesta dinámica del sistema, la variación de velocidad en fase gaseosa y los efectos intrapartículas. Sobre la base de simulaciones de reactores dinámicos, se propusieron estrategias de inyección de gas de extinción para controlar el perfil de temperatura del reactor y el rendimiento de los productos deseados. Los resultados de la simulación mostraron que la selección de una temperatura de entrada de alimentación es una variable importante que controla el sobrecalentamiento del reactor, por otra parte, se determinó que las inyecciones de apagado deben comenzar tan pronto la corriente de reactivo alcance la zona de apagado entre lechos para estabilizar la temperatura del reactor rápidamente durante el arranque. Asimismo, se determinó, que las longitudes de los lechos del catalizador deben ajustarse de manera que el calor liberado por las reacciones químicas se distribuya adecuadamente a lo largo del reactor. Todos estos aspectos son críticos para el diseño y la optimización de configuraciones de lecho de catalizador a escala comercial para el hidrotratamiento de materias primas renovables. Adicionalmente, se destacó que, mediante una configuración adecuada de extinción de gases, la temperatura del reactor puede controlarse adecuadamente, lo que permite incrementar el rendimiento de Diésel Renovable.

Los autores Calvancanti et.al (2022), en Brasil realizaron el estudio “Simulación del proceso de hidrotratamiento de aceite de soya para la producción de Diésel Verde”. Se propuso un modelo para el hidrotratamiento de aceite de soya para la producción de Diesel Verde o Diesel Renovable. El proceso fue simulado en Aspen Plus® v10; las reacciones de descarboxilación, descarbonilación e hidroxigenación se llevaron a cabo en un reactor estequiométrico en presencia de un catalizador $NiMo/Al_2O_3$. Además de las reacciones de craqueo y fraccionamiento, los combustibles produjeron Diésel Renovable, biocombustible de aviación y gases ligeros. El aceite de soya brasileño se utilizó como materia prima para producir el Diesel Renovable. Se realizaron análisis de sensibilidad para ajustar las mejores condiciones de fraccionamiento, considerando la composición del producto y la energía de la columna de destilación. Los mejores resultados se eligieron cuando la columna de destilación se configuró con 22 etapas, alimentación en la etapa 12 y relación de reflujo igual a 0,8. La relación hidrógeno/aceite de soya fue de 0,031. La energía utilizada en el proceso fue de 1181 kW/h. Más del 80 % del aceite de soya se convirtió en combustibles renovables y aproximadamente el 65 % en diésel verde (C10– C18). La curva de destilación de la norma ASTM D86 se comparó con resultados simulados de diésel verde obtenidos a partir de datos experimentales y diésel fósil. Este modelo de simulación ilustra el potencial del aceite de soya brasileño para la producción de combustibles renovables de calidad, como el Diésel Verde, cumpliendo así con los estándares de calidad.

A nivel de riesgos se han generado fugas en plantas en Europa y en el medio oriente en los procesos de obtención de biodiesel generando daño a la salud y también daño a los equipos ya que se generaron explosiones. Aunque la obtención sea amigable con el ambiente el proceso sigue siendo contaminante y perjudicial para los trabajadores por eso es necesario obtener un plan de seguridad y determinar a qué grados y escalas puede ser contaminante.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. Identificación del Problema

El consumo de diésel en Bolivia el pasado año (2021) fue 1.718 millones de litros, de este total el 50% es producido por nuestras refinerías en Bolivia y el otro 50% que termina de cubrir la demanda interna es diésel importado. La producción de Diesel Renovable en la Refinería Guillermo Elder Bell, pretende cubrir la demanda interna del departamento de Santa Cruz, lo que significa que cubrirá aproximadamente el 27% del total de la demanda interna en todo el país. De acuerdo al Ministerio de Hidrocarburos y según datos de la (IBCE, 2021), “en el departamento de Santa Cruz el mayor consumidor de diésel es el sector del parque automotor con el 86,5%, seguido del sector agropecuario y minería con el 7,3%, construcción (4,8%), y sector industrial (1,1%)” menciona la IBCE, (2021).

Por otra parte, Bolivia tiene el potencial para producir biomasa, como ser aceites vegetales hidrogenados, aceite comestible residual proveniente de la cocción de alimentos y grasas animales para la producción de Diesel Renovable. Por lo tanto, es importante realizar una investigación para la optimización del proceso productivo de Diesel Renovable a través del hidrotratamiento de aceites vegetales en la Refinería Guillermo Elder Bell, de esta manera aprovechar la biomasa disponible en el país.

Existe la necesidad de monitorear las propiedades fisicoquímicas y los sistemas de diésel renovable en tiempo real que pueden producir daños al entorno laboral y al medio ambiente; por lo tanto, es necesario controlar los procesos de reacción y conversión aceites vegetales a biodiesel renovable, evitando que se genera en accidentes dentro del proceso y es necesario contar con una base de datos que nos permita controlar estos daños y posibles accidentes. Es necesario encontrar métodos adecuados para lograr la optimización y estimación de la de la reacción, las condiciones del proceso y los niveles de riesgos en los procesos en la obtención de diésel renovable.

Las variables de estudio que deben considerarse para controlar los accidentes y daños en la seguridad y salud laboral en la obtención de diésel renovable son la, temperatura de las emisiones, estimación y análisis del rendimiento de los equipos, así como la fase de consumo de energía.

Con este nuevo estudio cuantitativo de riesgos se puede planificar y se podrá planificar en función al tiempo procesos y métodos de control y mitigación de riesgos ya sea en explosiones fugas accidentes laborales y todo tipo de problemas que se presente dentro del hidrotreatmento con aceites vegetales para la obtención de biodiesel y se podrá planificar mejor con una base de datos fidedigna para evitar gastos elevados en el control de peligros.

1.3.2. Formulación del Problema

A continuación, se plantea la siguiente pregunta de investigación para el desarrollo del proyecto de grado:

¿Cómo se puede controlar y predecir accidentes y riesgos laborales de explosiones dentro del proceso de hidrotreatmento de aceites vegetales para la obtención de diésel renovable?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Realizar un análisis de riesgos predictivo en la nueva planta de biodiesel dentro del proceso HVO (hydrotreated vegetable oil), aplicando inteligencia artificial computacional dentro de la refinería Guillermo Elder Bell.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Describir las características del proceso de hidrotreatmento de aceites vegetales que se aplicará en la refinería Guillermo Elder Bell para la obtención de biodiesel renovable.
- Evaluar la teoría de inteligencia artificial aplicado en el análisis de riesgos para el control de explosiones y fugas en los procesos petroquímicos.
- Elaborar las matrices de riesgos de cada área operativa y el planteamiento del mantenimiento predictivo.
- Identificar y clasificar los riesgos de mayor, mediano y bajo peligro en el proceso de hidrotreatmento.
- Aplicar la inteligencia artificial para el modelado de un programa predictivo de las consecuencias de accidentes utilizando el software Matlab.
- Realizar un programa de mitigación de riesgos a través del análisis cuantitativo de riesgos anteriormente identificado, plasmando tiempos y métodos de control de fugas, daños y corrosiones.

- Realizar un estudio de factibilidad técnica y un estudio de factibilidad económica.

1.5. JUSTIFICACIÓN

El proyecto es una planificación de mitigación de riesgos basado en un análisis cuantitativo computacional predictivo previo a la construcción de la planta de hidrotreatmento de aceites vegetales para la refinería Guillermo Elder Bell.

1.5.1. Justificación Técnica

Un análisis y control de riesgos tiene como objeto garantizar un ambiente de trabajo desprovisto de riesgos además de mantener estándares altos de seguridad y proteger la salud psicofísica de los trabajadores. Por otro lado, se debe proteger los equipos y maquinarias que forman parte de la instalación de la planta HVO. Por tal razón, es menester implementar un Programa de Seguridad y Salud en el Trabajo y posteriormente con ayuda de softwares especializados convertir este procedimiento manual a una actividad automática y de esa manera tener ventaja sobre siniestros que puedan ocurrir.

1.5.2. Justificación Social

La mitigación de riesgos es una técnica que toma decisiones con anticipación y aumenta la resiliencia para reducir o eliminar a largo plazo el impacto (pérdida de vida y propiedad) proveniente de peligros naturales y antropogénicos. Por lo tanto, una mitigación como una base de datos cuantitativas sólida evitará el daño al personal que trabajará en esta planta y también evitará posibles muertes en lo futuro.

1.5.3. Justificación Ambiental

El proyecto al ser una propuesta de mitigación de riesgos a partir de un análisis cuantitativo computacional protegerá al medio ambiente, ya que al no existir accidentes no se generan daños al medio ambiente ni tampoco contaminación. El control de fugas evita contaminar el medio ambiente ya que todos estos compuestos químicos dañan el entorno.

1.5.4. Justificación Económica.

Una de los objetivos principales de todo proyecto es que este mismo sea factible y no muy costoso, ya que al evitar todo tipo de accidentes se evita el gasto de dinero en la remuneración de los daños y la indemnización del personal ahorrándonos millones de dólares en estos pagos y en multas. Por otra parte, la propuesta de mitigación y el costo de levantamiento de datos son relativamente barato a comparación de gasto en mantenimientos.

1.5.5. Justificación Teórica

Para resguardar la salud y seguridad de los trabajadores es importante como tener la certeza de las formas de controlar los peligros presentes en un área de trabajo.

De ahí que para que este tipo de sistemas sean completamente seguros requieren grandes inversiones y desarrollos hasta conseguir que, efectivamente, tengan un papel importante en la reducción de la accidentabilidad laboral. De todo esto que, mientras termina de avanzar la tecnología, se esté aplicando ya en materia de prevención de Riesgos Laborales desde perspectivas menos intrusivas, por ejemplo, mediante la emisión de consejos sobre la realización de las operaciones o el comportamiento de los trabajadores en función del análisis que realiza de distintos datos.

1.6. ALCANCE

1.6.1. Alcance Temático

El presente estudio está enfocado en el modelado del proceso químico que se usará en la nueva planta HVO, que estará integrada en la refinería GEB. Así mismo, se aplican conceptos de análisis de riesgo mediante técnicas cuantitativas, además, se utilizan herramientas de la programación mediante software Matlab. Este estudio usó asignaturas del área de: operaciones unitarias, instrumentación y automatización, procesos petroquímicos, matrices, programación y conceptos de seguridad industrial.

1.6.2. Alcance Geográfico

Este proyecto se lleva a cabo para la futura construcción de la planta de hidrotreatmento de aceite vegetal para la obtención de biodiesel instalado dentro de la refinería Guillermo Elder Bell ubicada en el estado plurinacional de Bolivia, departamento Santa Cruz, provincia Andrés Ibáñez.

1.6.3. Alcance Temporal

El tiempo para el desarrollo de este proyecto se pronostica para un tiempo de 3 meses desde la elaboración de este perfil el análisis cuantitativo de riesgo predictivo hasta el diseño del programa de mitigación de riesgos de fugas y explosiones. Se pretende comenzar en el mes de agosto y concluirlo en el mes de noviembre.

1.7.METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.

1.7.1. Paradigma de investigación científica.

Este trabajo es teórico y de diseño aplicando de análisis cuantitativo y cualitativo de riesgos.

1.7.2. Enfoque de la investigación científica

La investigación tiene un enfoque cuantitativo y cualitativo, ya que se identifican valores de caudales para las fugas de gas, porcentajes de riesgos de posibles explosiones y también se proponen soluciones cualitativas para la mitigación de estos riesgos.

1.7.3. Tipo de investigación

El tipo de investigación que se desarrolla es de tipo cuantitativo, ya que se obtendrán valores futuros de posibles probabilidades y posibles impactos que generarían la fuga, los accidentes laborales y las explosiones dentro el proceso de obtención de biodiesel en el hidrotratamiento de aceites vegetales.

1.7.4. Diseño de la investigación científica

1.7.4.1. Método deductivo

El método deductivo consiste en deducir una idea general a partir de una idea específica, en este caso se tendrán ciertos valores de caudales de fuga que se podrían presentar, aunque no se haya construido aun la planta.

1.7.4.2. Método lógico deductivo

El método lógico deductivo consiste reducir ciertos comportamientos O valores a partir de datos lógicos. En este caso se obtendrán con ciertas ecuaciones los valores de riesgos y caudales de fuga que se pueden generar en el tiempo a través del análisis computacional para futuros tiempos y no solo en el presente.

1.7.4.3. Método descriptivo

El proceso descriptivo utiliza un análisis cualitativo a partir de datos cuantitativos. En este caso a partir de los datos que se obtengan con la predicción de los valores de riesgos, caudales de fuga y tiempos de posibles explosiones en el proceso de hidrotratamiento de aceites vegetales, se describiría un proceso de mitigación en tablas para la consideración de la empresa YPFB y puedan seguir este procedimiento en caso de accidentes.

CAPÍTULO II.

PROCESO DE OBTENCIÓN DE DIESEL RENOVABLE A PARTIR DEL HIDROTRATAMIENTO DE ACEITES VEGETALES

2.1. BIODIESEL

Según la definición de la ASTM, el biodiesel son ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga, derivados de lípidos tales como aceites vegetales o grasas de animales, y que se pueden emplear en motores de ignición de compresión o sea los motores del tipo diésel, rescatado de *Blend Stock for Destillate Fuels* (2002).

El diésel verde es un biocombustible líquido producido a partir de los aceites vegetales y grasas animales, siendo el aceite vegetal de las plantas *Jatropha curcas*, palma africana, soya, la colza, y el girasol, las materias primas más utilizadas mundialmente para este fin. El término “bio” hace referencia a su naturaleza renovable y biológica en contraste al diésel fósil; por su parte diésel alude a su uso en motores de este tipo creados por Rudolph Diesel en 1883 afirma el autor Ríos (2002).

El biodiesel es una “mezcla de alcanos que resulta de la hidrodesintegración de aceites vegetales y requieren altas presiones de hidrógeno, temperatura y un catalizador para convertir la materia prima en diésel renovable, definido así por Sotelo-Boyás y cols. (2008)

Según la ABI (2022) la materia prima para la producción de estos combustibles no es únicamente la soya, sino otras plantas como ser la *Jatropha*, el totaí, el cusi y otras, de las cuales se obtienen aceites vegetales de segunda generación que no son aptos para el consumo humano.

Las propiedades del diésel renovable son muy similares a las del diésel de origen fósil, en cuanto a densidad, número de cetano, eficiencia y rendimiento en los motores, destacándose que el biodiesel presenta un punto de inflamación superior. Asimismo, el producto diésel renovable a nivel mundial es usado como aditivo para la mezcla con combustibles de origen fósil, y los estudios también determinarán el porcentaje de mezcla según exigencias del mercado. Por todo ello, el biodiesel puede mezclarse con el diésel fósil en cualquier proporción que se desee: B5 – B10 – B30 – B50, etc. e inclusive sustituirlo totalmente: B-100.

2.1.1. Propiedades del Diesel Verde

El diésel verde presenta excelentes propiedades físicas y químicas que son similares a las del diésel fósil y al obtenido por el proceso Fischer Tropsch. Este consiste principalmente de alcanos de cadena lineal y en algunos casos, de iso-alcanos. Se encuentra libre de aromáticos, oxígeno y azufre. Además

tiene un alto índice de cetano gracias a que dentro de los alcanos contenidos en él, se encuentra el hexadecano, que por sus propiedades de autoinflamación, cuando se mezcla con el aire es el compuesto de referencia de alta calidad en la escala de cetano, sin embargo, el biodiesel puede contener una gran cantidad de especies de cadena corta e isómeros, esto dependerá del catalizador empleado así como también de las condiciones de reacción de hidrotratamiento, lo que puede ocasionar que el índice de cetano sea menor, pero las propiedades de fluidez ante un clima frío serán mejores, ya que el punto de fusión de moléculas pequeñas es más bajo. Por otro lado, un alto contenido de n-parafinas en el biodiesel disminuye el punto de nube aumentando la tendencia del combustible a tapan los filtros.

Debido a que el diésel está compuesto principalmente de carbono e hidrógeno, éste tiene un contenido energético mayor comparado a otros combustibles, por ejemplo, el biodiesel, que está compuesto por ésteres metílicos de ácidos grasos con alto contenido de oxígeno. La alta relación atómica de H/C favorece una capacidad energética mayor que los combustibles derivados del petróleo que contienen una gran cantidad de compuestos aromáticos insaturados. La tabla 2.1. muestra sus propiedades.

Tabla 2.1. Propiedades del diésel verde y los métodos empleados para su determinación.

Propiedad	Unidades	Valor	Método
Punto de inflamación	°C	71	ASTM 93
Agua y sedimentos	%vol	0	ASTM D2709
Destilación física	°C	292,6	ASTM D86
Viscosidad cinemática a 40 °C	cSt	2,835	ASTM D445
Ceniza	% en peso	< 0.0001	ASTM D482
Azufre	ppm	< 3.0	ASTM D5453
Condiciones		3 a 50 °C	ASTM D130
Clasificación		1ra	
Número de cetano		Mayor a 66	ASTM D613
Punto de nube	°C	-8	ASTM D2500
Carbón residual RCR 10%	% en peso	0.02	
Lubricidad	Micron	450	
Conductividad	pS/m	3	ASTM D2624

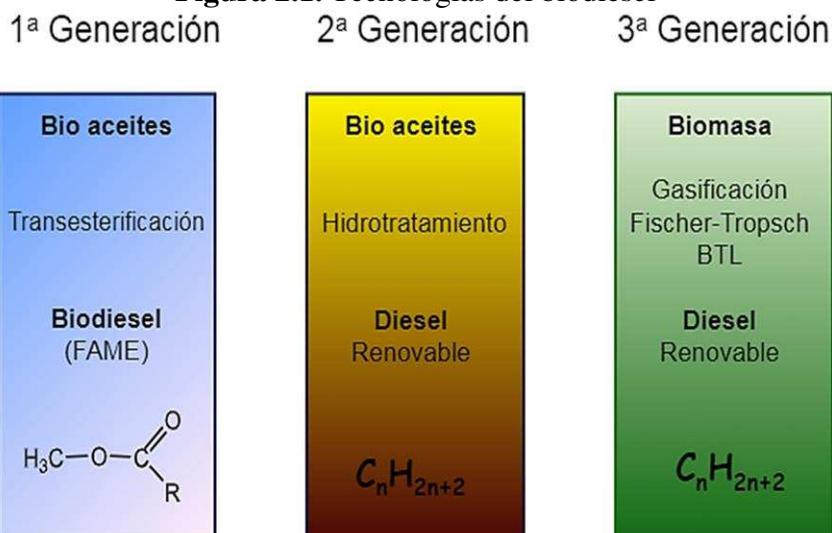
Fuente: Kalnes,2010.

2.2. PROCESOS DE OBTENCIÓN DEL BIODIESEL

Cualquier aceite vegetal puede ser utilizado como materia prima principal para la producción de diésel renovable, como ser aceites de soja, girasol, colza, jatropha, tártago, ricino, aceites usados de fritura, etc. También pueden ser utilizados sebos vacunos, porcinos, de aves, de pescado, etcétera.

Otra alternativa interesante para la producción de biodiesel, es la utilización de aceites usados (aceites de fritura), ya que es la materia prima más barata y con su utilización, se evita la contaminación. La figura 2.1. muestra las tecnologías para nombrar a los diferentes biodiesel obtenidos.

Figura 2.1. Tecnologías del biodiesel



Fuente: Sotelo-Boyás, 2012.

2.2.1. Transesterificación (Proceso para Obtener Biodiesel Tecnología FAME)

El proceso de transesterificación consiste en hacer reaccionar triglicéridos con alcoholes, comúnmente metanol y etanol. El principal producto son metil ésteres y como único residuo de valor agregado propanotriol (glicerina).

Este proceso cuenta con 3 pasos principales. El primero es la conversión de triglicéridos a diglicéridos, seguido por la conversión de diglicéridos a monoglicéridos y por último la conversión de monoglicéridos a glicerol produciendo una molécula de metiléster en cada paso, señala el autor Freedman (1986).

Figura 2.2. Pasos de la Transesterificación de Triglicéridos con Alcohol



Fuente: Freedman, 1986.

El proceso mencionado emplea un catalizador y estos pueden variar según el medio en el que se desarrolla la reacción que puede ser de medio ácido o básico principalmente.

La reacción no requiere de otros reactivos, únicamente requiere el triglicérido, alcohol y el catalizador. En condiciones ambientales normales, la reacción puede no ocurrir o su acción sería muy lenta. Además, debido a que se trata de una reacción exotérmica, requiere temperatura para que la reacción proceda con buenos rendimientos, menciona Demirbas (2008).

Es importante notar que catalizador utilizado, no se consume durante la reacción, es decir, son agentes que, si bien intervienen en la reacción, al final de esta son regenerados según Fukuda (2001).

2.2.1.1. Transesterificación Utilizando Bases.

Este es el proceso más simple y más utilizado para obtener biodiesel. Sin embargo, requiere de un “aceite con bajo contenido de ácidos grasos libres, agua y otras impurezas, o de procesos adicionales de pre tratamiento de la materia prima”. Además, requiere de etapas posteriores de tratamiento del biodiesel para reducir su contenido de impurezas procedentes del proceso, como restos de catalizador.

El proceso se realiza a través del mecanismo de reacción conocida como sustitución nucleofílica, usando una base fuerte (NaOH o KOH), capaz de desprotonar el alcohol. Comúnmente, la base es disuelta en el alcohol para dispersarla en todo el aceite. El hidróxido debe ser muy seco ya que cualquier cantidad de agua en el proceso aumenta las probabilidades de saponificación y producir jabones consumiendo la base. Una vez hecha la mezcla de alcohol y base, esta es agregada al triglicérido.

El átomo de carbono del grupo carbonilo del éster triglicérido tiene una carga parcialmente positiva y el átomo de oxígeno del grupo carbonilo tiene una carga parcialmente negativa. Esta polarización del grupo C=O es la que atrae al ion hidroxilo (-OH) al lugar de reacción, según el autor Fukuda (2001).

La mezcla se debe agitar a 60 °C y presión atmosférica. Una reacción exitosa muestra 2 fases, una del Éster y otra del Glicerol. La separación se realiza mediante decantación y la purificación del Éster mediante extracción líquido-líquido empleando agua como solvente según Uribe (2010).

2.2.1.2. Transesterificación con Catalizador Ácido.

El proceso es catalizado por ácidos Brønsted como ácido sulfónico (H_2SO_3) y ácido sulfúrico (H_2SO_4). Este tipo de catálisis genera una alta producción de ésteres alquílicos, desafortunadamente se trata de reacciones lentas comparadas con las catalizadas por bases. Este tipo de catálisis es aplicado cuando las grasas o aceites contienen altas cantidades de AGL (Ácidos Grasos Libres) y humedad. Además de aplicar para aceites de menor grado como el aceite de Oliva, según Demirbas (2008).

2.2.2. Hidrotratamiento Catalítico (HDT - Proceso para Obtener Diesel Renovable Tecnología HVO)

El hidro procesamiento es un proceso catalítico importante dentro del esquema de refinación en el que las reacciones que ocurren pueden ser clasificadas en dos grupos: a) hidro desintegración catalítica y b) hidrotratamiento. La hidro desintegración catalítica consiste en la ruptura de cadenas hidrocarbonadas que favorece la conversión de componentes de alto peso molecular a productos más ligeros,

afirma el autor Sotelo-Boyas (2012). Por su parte, el hidrotratamiento que implica la hidrogenación y cuyo objetivo es eliminar algunos tipos de contaminantes presentes en el petróleo, como son compuestos que contienen oxígeno, cuyo proceso se llama hidro desoxigenación (HDO); eliminación de azufre conocida como hidro desulfuración (HDS); eliminación de nitrógeno y que se denomina como hidrodensnitrógeno (HDN); eliminación de compuestos aromáticos, que se conoce como hidrodensaromatización (HDA); y finalmente la hidrodensmetalización que es la eliminación de metales pesados (HDM).

La configuración básica del proceso de hidrotratamiento dentro de una refinería consiste en mezclar la alimentación con una corriente de hidrógeno y gas de reciclo proveniente del reactor. La mezcla intercambia calor con el efluente del reactor y se calienta en un horno, posteriormente esta mezcla es cargada al reactor con el catalizador. El intervalo de operación de la temperatura de reacción empleada en el proceso se encuentra entre 300-380 °C, la presión de hidrógeno varía entre 1-2 MPa cuando se trata del hidrotratamiento de nafta y de 3 a 4.5 MPa cuando se trata de diésel y se emplea un catalizador bifuncional (metal/ácido). Luego de que los productos de reacción salen del reactor son enfriados a un intervalo de temperatura entre 40-50 °C, y son enviados a un separador líquido/gas. El hidrógeno que sale de la corriente de gas de alta presión es reciclado para ser combinado con la alimentación, y el gas que proviene de la corriente de baja presión es enviado a la unidad de tratamiento de gas.

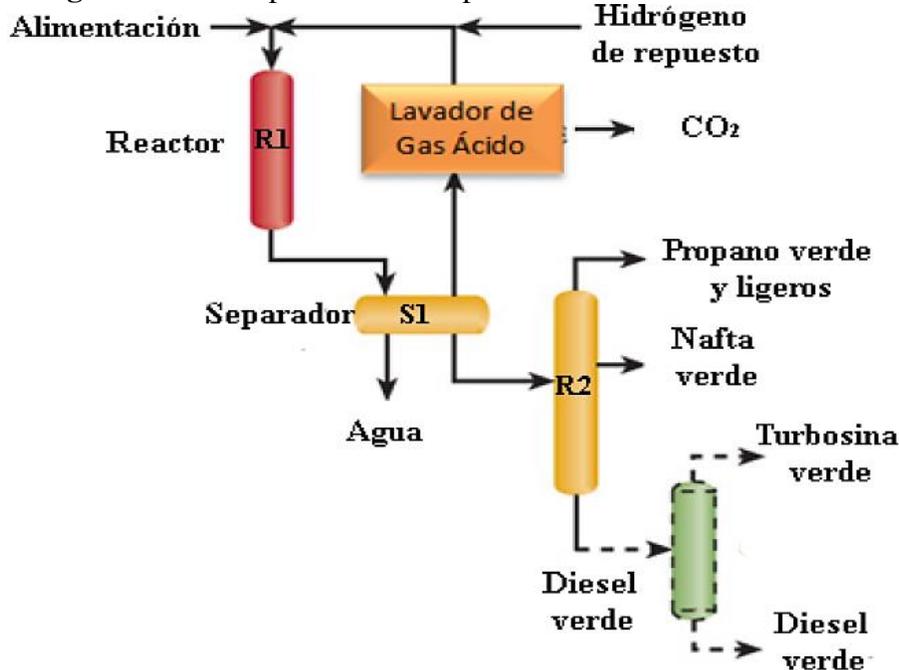
2.3. PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL DIESEL VERDE

Existen dos rutas para la conversión de aceite vegetal en diésel, una de ellas es el coprocesamiento que consiste de dos unidades para la producción de diésel, en donde el aceite es pretratado para remover impurezas para posteriormente será alimentada al reactor donde éste será mezclado con el diésel mineral crudo. En la segunda ruta de conversión el aceite vegetal es alimentado al reactor donde es mezclado con hidrógeno en el que al final del hidrotratamiento se obtienen como productos diésel renovable, gas LP y en baja proporción turbosina y gasolina renovables. En este trabajo se está utilizando la segunda ruta de conversión.

En la Figura 2.4 (Kagan, 2010), se muestra un esquema tradicional a escala industrial del hidrotratamiento propuesto por la UOP en donde la alimentación se mezcla con el hidrógeno para posteriormente pasar al reactor R1, y es ahí donde se llevan a cabo las reacciones de hidro desoxigenación, desoxigenación y descarbonilación del aceite vegetal, después el efluente pasa a un separador S1 para remover el agua, los gases ácidos como el CO₂, y los hidrocarburos de bajo peso molecular. Poste-

riormente, los productos pasan a un segundo reactor R2, donde ocurren las reacciones de hidro-isomerización produciendo propano, nafta y diésel verdes, de esta manera las propiedades del diesel en un clima frío son mejoradas. Estas reacciones de hidro-isomerización son selectivas, lo que resulta en un bajo consumo de hidrógeno. Finalmente, el diésel pasa a un contenedor en donde se le da un post-tratamiento para obtener diésel y turbosinas verdes. El acrónimo HVO significa “Aceites Vegetales Hidrotratados”.

Figura 2.4 Hidro procesamiento para la obtención de diésel verde.



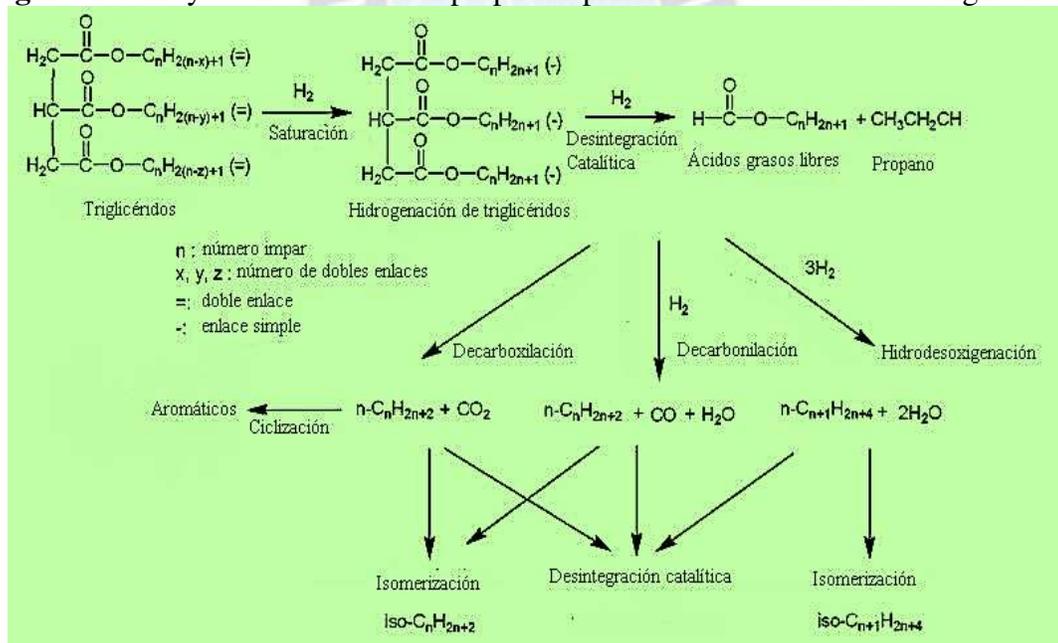
Fuente: Kagan, 2010.

2.3.1. Reacciones Principales en el Hidrotratamiento Catalítico para la Producción de Diesel Verde

El conjunto de reacciones del hidro procesamiento, para su mejor entendimiento, se clasifica en dos tipos: el hidrotratamiento y la hidro desintegración. El hidrotratamiento catalítico es un término colectivo que engloba a los procesos que remueven heteroátomos de las moléculas de aceites, como azufre, oxígeno y nitrógeno. La hidrogenación es una clase de reacción química que es producto de la adición de hidrógeno a las moléculas de hidrocarburos. Un tipo de reacción de hidrogenación es la hidrogenólisis que resulta de la escisión del enlace C-X, donde C es carbono, y X es cualquier heteroátomo (e.g. S, O, N). El producto resultante de la hidrogenólisis es la formación de los enlaces C-H y H-X, donde H es hidrógeno, según Kalnes (2007). En las reacciones de hidrodesintegración catalítica los hidrocarburos de alto punto de ebullición se convierten en compuestos de menor temperatura de destilación por hidrogenación simultánea o secuencial y el rompimiento de enlaces C-C.

Algunos autores como Huber y col. (2007), Donnis y col. (2009), Kubicka y col. (2009) y Veriansyah y col. (2011), han planteado algunas rutas de reacción de la hidroconversión de aceites vegetales, como la propuesta para el hidrotreatmento de triglicéridos (Figura 2.4), en la que como primera etapa los enlaces C=C presentes en los triglicéridos son hidrogenados, posteriormente, éstos forman ácidos grasos libres, diglicéridos y monoglicéridos mediante la escisión de propano de la cadena principal de glicerol de los triglicéridos en presencia de hidrógeno, éstos posteriormente son convertidos en alcanos mediante tres rutas de reacción que son: la descarboxilación, descarbonilación y la hidro desoxigenación, siendo estas dos últimas las que requieren hidrógeno para llevarse a cabo, por lo tanto la distribución de los productos se verá directamente influenciada por la presión de reacción. Con estas reacciones se pretende eliminar el oxígeno de la molécula de aceite vegetal, para mejorar la calidad del combustible obtenido ya que los componentes oxigenados producen agua en presencia de hidrógeno, y ésta puede afectar la actividad de los catalizadores, deteriorar los productos durante su formación y causar impurezas.

Figura 2.4. Trayectoria de reacción propuesta para el hidrotreatmento de triglicéridos.



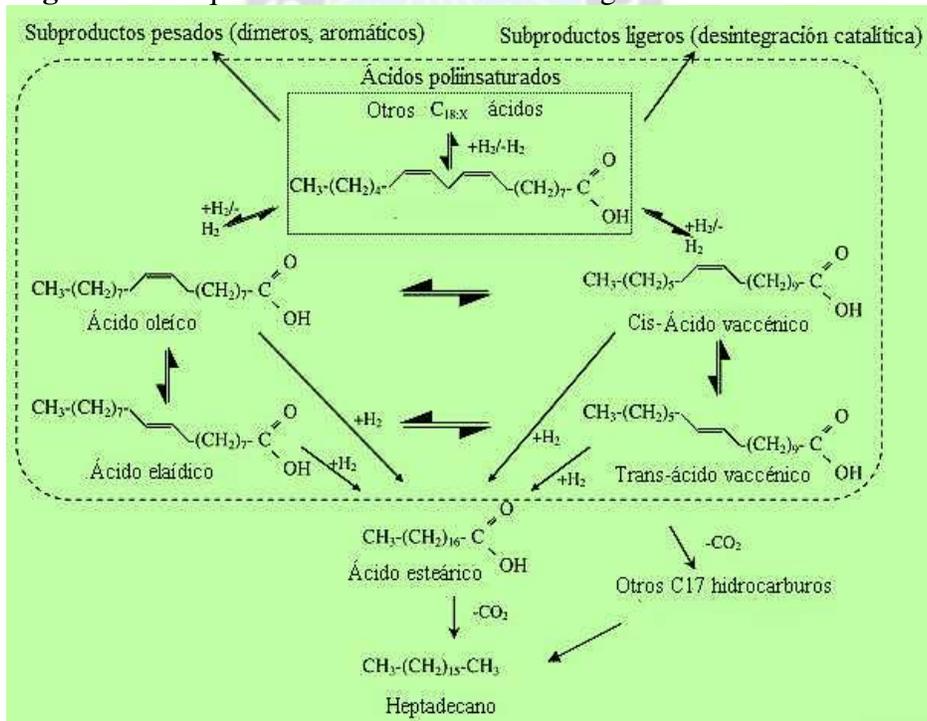
Fuente: Sotelo Boyas, 2012.

En la Figura 2.5, en las reacciones de descarboxilación y descarbonilación, el ácido carboxílico es convertido en alcanos con un carbono menos en su longitud respecto al ácido graso del cual fueron obtenidos y CO_2 en el caso de la descarboxilación y CO más agua en las reacciones de descarbonilación. En la hidro desoxigenación se obtienen alcanos de la misma longitud que el ácido graso del cual

proviene además de agua. Posteriormente pueden ocurrir reacciones de ciclización para obtener aromáticos, isomerización y desintegración catalítica, sin embargo, esto dependerá de las condiciones de operación y el catalizador empleado en el hidrotreatmento.

Los autores Snare (2006), Lestari (2009) Kubiča (2010) y Morgan (2012), han realizado numerosos estudios de la reacción de hidrogenación presente en el hidrotreatmento de aceites vegetales. Snare, Kubičková, Mäki, Eränen, & Murzin (2008) propusieron el mecanismo de desoxigenación del ácido oleico como se observa en la Figura 2.5, en donde los dobles enlaces del ácido oleico son hidrogenados y el oxígeno removido, esto ocurre mediante una isomerización posicional y geométrica dando lugar a los ácidos vaccénico y eláidico que parecen ser las reacciones intermedias antes de que la hidrogenación se lleve a cabo, para posteriormente dar paso a la desoxigenación obteniendo como producto principal al n-heptadecano, con pequeñas cantidades de isómeros posicionales insaturados (1-, 3-, y 8-heptadecano) y algunos aromáticos.

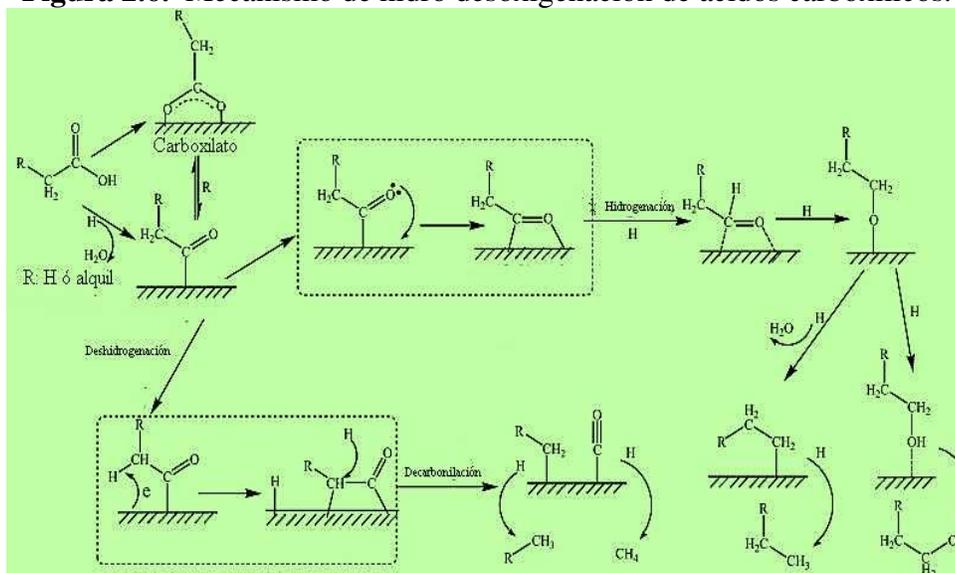
Figura 2.5. Esquema de reacción de la desoxigenación del ácido oleico.



Fuente: Sotelo Boyas, 2012.

En la Figura 2.6 se muestra un esquema representativo de la ruta que sigue el ácido carboxílico en las reacciones de descarboxilación y descarbonilación.

Figura 2.6. Mecanismo de hidro desoxigenación de ácidos carboxílicos.



Fuente: Sotelo Boyas, 2012.

Los datos termodinámicos para la producción de hidrocarburos lineales C17 a partir del ácido esteárico a 300 °C, siguiendo las tres rutas de reacción antes mencionadas, fueron determinados por Snare y col. (2006) y se muestran a continuación:

Reacciones en fase líquida				ΔG_{300} (kJ/mol)	ΔH_{300} (kJ/mol)
Descarboxilación	R-COOH	\longrightarrow	R-H + CO _{2(g)}	-83.5	9.2
Decarboxilación	R-COOH	\longrightarrow	R'-H + CO _(g) + H ₂ O _(g)	-17.0	179.1
	R-COOH + H _{2(g)}	\longrightarrow	R-H + CO _(g) + H ₂ O _(g)	-67.6	48.1
Hidrogenación	R-COOH + 3H _{2(g)}	\longrightarrow	R-CH ₃ + 2H ₂ O _(g)	-86.1	-115.0

Dónde:

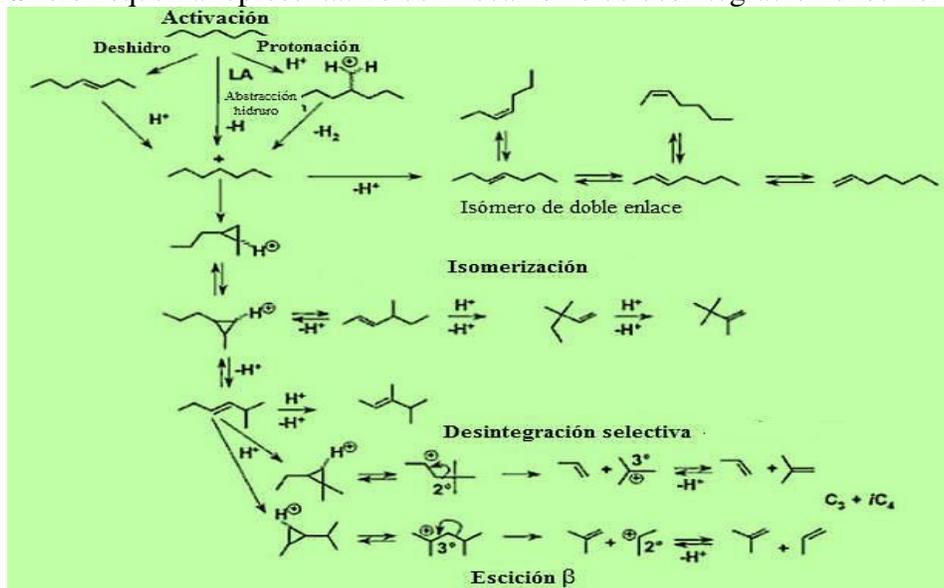
R = grupo alquil saturado

R' = grupo alquil insaturado

Los autores Honkela y col. (2010) propusieron un mecanismo que representa la isomerización de las parafinas, en la figura 2.7. En los catalizadores bifuncionales están presentes los sitios ácidos de Brönsted que isomerizan y desintegra las n-parafinas llevándose a cabo la escisión β ya que la ramificación de la cadena requiere de un intermediario para que se desintegre catalíticamente a partir de este mecanismo. En este mecanismo la parafina es activada, es decir, es convertida en olefina. Esto podría suceder por la presencia del sitio metálico en el catalizador, que tiene la función de deshidrogenar, es entonces que la olefina es fácilmente protonada por el sitio ácido del catalizador seguido de

la isomerización estructural. El ajuste de la fuerza del sitio ácido o de las condiciones del proceso se ven reflejados en la desintegración de las iso-olefinas para producir la desintegración catalítica al final de la molécula de la parafina. La olefina es saturada después de que la desorción se ha llevado a cabo, esto puede ser mediante la función metálica del catalizador.

Figura 2.7. Esquema representativo del mecanismo de desintegración e isomerización



Fuente: Honkela, 2010.

2.3.2. Catalizadores y Soportes para el Hidrotratamiento del Aceite Vegetal

La mayoría de los catalizadores de hidrotratamiento poseen una función de desintegración catalítica y otra de hidrogenación/deshidrogenación. Las funciones de desintegración catalítica y de isomerización son provistas por un soporte ácido, mientras que el metal proporciona la capacidad de hidrogenación/deshidrogenación. Otra de las propiedades con las que debe contar un catalizador de hidrotratamiento de aceite vegetal, es la capacidad para la remoción de oxígeno según el autor Scherzer & Gruia, (1996). La figura 2.8. muestra un esquema de función de los catalizadores.

Figura 2.8. Composición de los catalizadores de hidrotratamiento.



Fuente: Sotelo Boyas, 2012.

Los autores Liu, Sotelo-Boyás, Murata, Minowa, & Sakanishi, (2011) estudiaron el efecto del soporte en las reacciones de hidrotratamiento de distintos aceites vegetales y encontraron que los catalizadores soportados en zeolitas presentan una mayor selectividad hacia la producción de cadenas cortas de hidrocarburos, que se encuentran presentes en la gasolina, lo cual se debe a los sitios ácidos fuertes que posee. Por otro lado, los catalizadores soportados sobre Al_2O_3 y SiO_2 dieron como productos n-alcenos, pero las propiedades ante un clima frío no eran satisfactorias. Finalmente, con el soporte $Al_2O_3 - SiO_2$ se obtuvieron una mayor cantidad de isómeros en el producto líquido lo que se vio reflejado en el punto de fluidez del producto, siendo de $-10\text{ }^\circ\text{C}$, además, el combustible obtenido resultó tener propiedades muy similares a las del diésel obtenido del petróleo.

2.4. RIESGOS EN PROCESOS PETROQUÍMICOS

Según los autores De Gracia y García (2008) en su libro titulado “Seguridad Industrial En Plantas Químicas Y Energéticas” la secuencia accidental en plantas químicas, se pueden dar, de manera incompleta o total y suelen ser:

- a) **Emisión:** derrame (líquidos) o escape (gases y vapores) generalmente por pérdida de contención de los fluidos. Puede generar efectos tóxicos, incendios y/o explosiones según la naturaleza de las sustancias emitidas.
- b) **Incendio:** combustión (de varias formas) de los fluidos contenidos o emitidos, generando radiación térmica dañina, cuando aquéllos son inflamables.
- c) **Explosión:** anterior (por ejemplo, de aparatos) a la emisión o posterior (por aceleración de la combustión) al incendio, generando ondas de presión o de sobrepresión que son dañinas. La explosión puede también dar lugar a la propagación de proyectiles.

2.4.1. Tipología de Accidentes

Una vez considerada la naturaleza individual de los mismos se deberá tener en cuenta la posibilidad de que unos den lugar a otros, en cadena o en lo que se denomina “efecto dominó”.

2.4.1.1. Fugas: escapes y derrames

La evolución de una fuga depende de:

- a) Condiciones (presión, temperatura, cantidad) y estado físico del fluido fugado.
- b) Naturaleza química (inflamabilidad, toxicidad).

- c) Tipo de sistema de contención (equipo cerrado o abierto) en el que se origina la fuga.
- d) Condiciones de entorno (geometría, topografía, meteorología) hacia el que se produce la fuga.

2.4.1.2. Incendios

Los incendios son reacciones de oxidación, generalmente con aire como comburente, de materias combustibles. Los efectos de estos accidentes son:

- Calor (generalmente radiante) que produce daños de por sí y porque puede propagar la cadena accidental.
- Humos sofocantes y/o tóxicos.
- Onda explosiva de sobrepresión cuando se dan ciertas condiciones de aceleración de la velocidad de reacción y/o de contención. Otro efecto que puede propagar la cadena accidental.

En las instalaciones químicas y energéticas los incendios pueden ocurrir de varias maneras que dependen de la naturaleza (propiedades físicas y químicas) y de la disposición del combustible.

A) Incendio de líquido en disposición abierta (de charco/pool-fire).

Se trata de un caso en el que el incendio se produce en una condición abierta (no presurizada).

- i. Líquido derramado en un área más o menos extensa.
- ii. Recipiente abierto (sin techo) o a presión atmosférica.

Las manifestaciones de este tipo de incendio suelen ser la emisión de calor radiante y la de humos.

B) Incendio de líquido con rebosamientos violentos (boil-over y slop-over).

Se trata de complicaciones del caso anterior que, generalmente, se presentan en los incendios de tanques para almacenamiento donde la altura de líquido combustible es considerable. Los dos fenómenos ya mencionados dan lugar a proyecciones o rebosamientos que pueden propagar el incendio y/o sus efectos dañinos.

La combustión en la superficie del líquido genera calor que se transmite (por conducción y convección) hacia las capas inferiores del mismo. En estas últimas se da la presencia de agua (decantada o emulsionada) procedente: a) del propio almacenamiento o b) de la inyección extintora de agua o espuma. Se producirá ebullición de la misma con formación de burbujas grandes de su vapor. Éste ascenderá a través del líquido impulsando parte del mismo de manera que rebosa o se proyecta fuera del tanque.

C) Incendio de gases o vapores en nube abierta (bola de fuego/fireball).

Es el caso de inflamación inmediata (no diferida) de una nube de gases o vapores que se ha situado de forma rápida en espacio abierto. Sus efectos intrínsecos son:

- i. Radiación térmica y de corta duración originada en una llama voluminosa.
- ii. Evolución hacia la forma de hongo por la ascensión de gases muy calientes y más ligeros que el aire.
- iii. Sobrepresión no significativa.

D) De gases o vapores en fuga local presurizada (dardo/jet-fire).

Cuando hay una fuga localizada de gases o vapores (inflamables) a presión (por ejemplo, a través de perforaciones, bridas o estopadas no estancas, etc.), éstos se pueden incendiar dando lugar a un fuego semejante al del dardo de un soplete. Tal tipo de incendio tiene un peligro relativamente bajo en sí mismo (se deberá cortar la fuente de presión y caudal que origina la fuga y proceder a la extinción), pero si el dardo afecta a equipo colindante, puede dar lugar a otros accidentes más graves. Ello determina que se deba evitar la cercanía de elementos propensos a fugas con respecto a otros para evitar tal efecto de propagación.

2.4.1.3. Explosiones

Las explosiones son fenómenos caracterizados por el desarrollo de una presión (dentro de sistemas cerrados) o de una onda de sobrepresión (en espacios abiertos) que dan lugar a daños mecánicos.

Según su origen y naturaleza las explosiones pueden estar en el inicio de una fuga (con consecuencias tóxicas y/o incendiarias) o deberse a la evolución de una combustión auto acelerada hacia la detonación (propagación supersónica) como se verá más adelante. La clasificación de los tipos de explosiones incluye, la consideración de origen, de los materiales y del grado de contención que los caracterizan.

Las explosiones se clasifican como sigue:

- 1) Explosiones antecedentes iniciadoras: por exceso de presión, por debilitamiento de los materiales en los continentes, por fuga con ebullición normal por fuga o masiva (BLEVE)
 - i. Iniciadoras de fugas
 - ii. Como consecuencia de fugas
- 2) Explosiones consecuentes de un incendio
- 3) Explosiones consecuentes de otras explosiones

i. Explosiones iniciadoras de fugas

Como se ha dicho antes, son las que dan lugar a una fuga iniciando así una cadena accidental que puede continuar con emisión tóxica, incendio y otras explosiones. Se pueden clasificar según se den en sistemas cerrados o en sistemas semiabiertos.

Tabla 2.2. Clasificación de las explosiones en sistemas cerrados (CVCE) y abiertos.

EXPLOSIONES INICIADORAS EN SISTEMAS CERRADOS (CVCE)	Por exceso de presión	Por causas del proceso: conexión indebida a equipo con presiones mayores, golpes de ariete, etc.
		Reacciones o descomposiciones exotérmicas descontroladas o indebidas (incluye las combustiones explosivas).
		Por dilatación una fase líquida única.
	Por debilitamiento de materiales al calor, frío, corrosión.	-
EXPLOSIONES INICIADORAS EN SISTEMAS SEMI ABIERTOS POR DES-PRESURIZACIÓN DE LÍQUIDOS.	Fuga controlada (sin explosión ni incendio)	-
	Fuga corriente	-
	Fuga con ebullición	Sin ebullición masiva
		Con ebullición masiva (efecto BLEVE)

Fuente. De Gracia-García, 2008.

La apertura parcial de sistemas cerrados, pasándolos a la condición de semi abiertos, ocurre cuando se produce un orificio (por impacto de un proyectil, por apertura de un dispositivo de alivio (válvula de seguridad o disco de ruptura), etc., o una grieta (por fallo del material, como efecto de un impacto, choque o calor de incendio exterior). En algunos casos se produce entonces una fuga corriente de fluido a presión o una fuga controlada (por ejemplo: recogida a un colector y enviada a su tratamiento o destrucción). Hay otro caso que debe ser objeto de consideración especial dada la índole dramática de las consecuencias que pueden derivarse de la fuga. Se trata de aquellos sistemas que contienen líquido/vapor a temperatura superior a la que corresponde al equilibrio entre dichas fases a la presión atmosférica. Se trata de un caso frecuente en las industrias que nos ocupan: recipientes para almacenamiento y proceso de gases licuados de todo tipo (GLP, GNL, amoníaco, etc.), líquidos calientes en reactores y hornos, agua en determinadas secciones de las calderas de vapor, etc. En tales situaciones la apertura parcial del sistema, por cuales quiera de los medios indicados, provoca el desarrollo de la secuencia siguiente:

a) **Situación inicial:** líquido contenido en equilibrio (presión y temperatura: t_1 , P_1) con su vapor ambos a temperatura superior a la que corresponde el equilibrio L/V a presión atmosférica (t_a , P_a): $t_1 > t_a$, $P_1 > P_a$.

b) **Despresurización súbita** (por la citada apertura parcial del sistema) cayendo la presión desde su valor inicial P_1 en a) hasta la presión atmosférica P_a . Consecuencia: líquido en condición de equilibrio metaestable ($t_2 = t_1$; $P_2 = P_a$) y transitorio; se dice que está sobrecalentado por encontrarse a una temperatura superior a la que corresponde al equilibrio L/V a la presión atmosférica actual en esta etapa. Tal sobrecalentamiento constituye un potencial enorme para la evaporación de la fase líquida.

c) **Ebullición del líquido en situación inestable.** Según las propiedades del fluido y de las condiciones iniciales (t_1 ; P_1) del mismo, el grado de sobrecalentamiento ($t_2 - t_a$) puede ser menor o mayor que un cierto valor crítico. Por debajo de tal valor crítico se producirá una evaporación rápida e importante, aunque de efectos limitados. Si se iguala o se supera el valor crítico de sobrecalentamiento la ebullición será súbita y masiva con un aumento de volumen tal que determinará una onda mecánica de sobrepresión enorme. Esto último es lo que se denomina efecto BLEVE (boiling liquid expansion vapour explosion) que tiene efectos catastróficos.

d) **Rotura del sistema contenedor** (generalmente un recipiente). Al no poder resistir la potente onda de presión generada por el efecto BLEVE, el recipiente se rompe en pedazos que:

- Se disparan como proyectiles a distancias de hasta centenares de metros.
- Pueden arrastrar consigo porciones de líquido eventualmente peligroso.

La onda de explosión BLEVE se transmite en el espacio pudiendo causar daños mecánicos.

e) **Dispersión de niebla** (partículas de líquido suspendidas en vapor) procedente del fluido contenido inicialmente, formando una nube cuyo diámetro puede ser de algunos centenares de metros.

Con la formación de la nube citada en e) anterior terminan los efectos intrínsecos del efecto BLEVE. Tal nube, dependiendo de las características (toxicidad, inflamabilidad) de la materia que la constituye, es una fuente potencial de otros accidentes: contaminación, intoxicaciones, bola de fuego, deflagración con o sin detonación, etc. El hecho de que los accidentes con efecto BLEVE más catastróficos se hayan seguido de incendios y otras explosiones ha llevado a bastantes autores a asociar estos accidentes secundarios con el BLEVE originador. Ello puede llevar a la confusión del que aborda el estudio de estos accidentes, por lo que aquí deseamos dejar clara la separación entre la explosión BLEVE y sus eventuales accidentes secundarios.

i. Explosiones confinadas de polvo suspendido.

Debe incluirse aquí la consideración de las explosiones de polvo que acontecen en el interior del equipo para almacenamiento (silos, etc.) y manipulación (tolvas, conductos, molinos, transportadores de sólidos, etc.) de materias sólidas (carbón, granzas de plástico, etc.). Aunque no suelen dar lugar a fugas como los gases y vapores, las explosiones de polvo suspendido en aire acontecen según mecanismos y tienen consecuencias semejantes a las explosiones de aquéllos.

ii. Explosiones como consecuencia de fugas

1. Ignición diferida de gases y vapores no confinados (UVCE).

Este caso (UVCE = unconfined vapour cloud explosion) se produce cuando:

- La nube de vapor o gas fugado es inflamable.
- La ignición (diferida) de la nube se produce un tiempo después de la fuga.

En tal caso, una parte de la energía de la combustión se manifiesta en forma de energía mecánica asociando al fuego una onda de sobrepresión. Tal onda, a su vez, está conectada con el avance (subsónico: deflagración; supersónico: detonación) del frente de llama en el seno de la nube inflamada. Más adelante se detallará la descripción de los efectos de este tipo de explosión. Un caso de la modalidad que estamos considerando es la segunda explosión después de una con efecto BLEVE, si el vapor fugado es inflamable, y acompañada de incendio en bola de fuego.

2. Ignición diferida de polvos y nieblas no confinados.

Como se ha dicho anteriormente, las explosiones de polvo suspendido (a las que añadimos aquí las de niebla) acontecen según mecanismos (por ejemplo, ignición-deflagración-detonación) semejantes a los de gases y vapores. Sus efectos son también parecidos considerando:

- La carga energética por unidad de volumen es mayor para polvos y nieblas que para gases y vapores.
- Los polvos tienen menos capacidad de difusión (dispersión) en el espacio que gases, nieblas y vapores.

C) Explosiones como consecuencia de incendios

Para continuar el desarrollo posible de una cadena accidental conviene considerar aquí las explosiones que son consecuencia de un incendio, sin estar asociadas al desarrollo del mismo según B) anterior.

Ello ocurre cuando las llamas lamen la parte exterior de un contenedor (recipiente o tubería) calentándolo.

El calor originado en un incendio de cualquier tipo puede dar lugar a explosiones tales como las consideradas por otras causas en A) anterior:

C.1. En sistemas cerrados: por calentamiento de los contenedores (recipiente y tuberías).

C.2. En sistemas semiabiertos.

La propia apertura parcial del sistema puede deberse al fallo del material del continente por efecto del calor (sobre todo en la parte que está en contacto con la fase de vapor, no refrigerada por la ebullición del líquido). Lo anterior es aparte del calentamiento que da lugar a aumentos de presión y temperatura que también contribuirán a la explosión.

D) Explosiones como consecuencia de otras explosiones

Para completar la consideración de los eslabones posibles de una cadena accidental es conveniente mencionar aquí que una explosión puede desencadenar fugas, incendios y otras explosiones.

Por una parte, la onda explosiva puede deformar y hasta destruir equipos continentes (recipientes, tanques, columnas, tuberías, etc.) a su paso. Por otro lado, los proyectiles procedentes de una explosión pueden causar efectos similares. Las pérdidas de contención derivadas de tales eventos pueden continuar la cadena accidental.

Anteriormente se ha visto que los proyectiles procedentes de explosiones con efecto BLEVE pueden arrastrar consigo porciones de líquido que, si es inflamable, puede originar incendios subsiguientes lejos del origen.

2.5. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS ENFOCADO EN PLANTAS QUÍMICAS

A continuación, se presenta definiciones que se usaran en el presente trabajo:

2.5.1. Términos y Definiciones

2.5.1.1. Accidente de Trabajo.

Suceso repentino que sobreviene por causa o con ocasión del trabajo, y que produce en el trabajador una lesión orgánica, una perturbación funcional, una invalidez o la muerte. Es también accidente de trabajo aquel que se produce durante la ejecución de órdenes del empleador o durante la ejecución de una labor bajo su autoridad, incluso fuera del lugar y horas de trabajo.

2.5.1.2. Actividad rutinaria. Actividad que forma parte de un proceso para comprender la naturaleza del riesgo y para determinar el nivel del riesgo.

2.5.1.3. Actividad No Rutinaria.

Actividad que no se ha planificado ni estandarizado, dentro de un proceso de la organización o actividad que la organización determine como no rutinaria por su baja frecuencia de ejecución.

2.5.1.4. Análisis del Riesgo.

Proceso para comprender la naturaleza del riesgo.

2.5.1.5. Consecuencia.

Resultado, en términos de lesión o enfermedad, de la materialización de un riesgo, expresado cualitativa o cuantitativamente.

2.5.1.6. Elemento de Protección Personal (EPP).

Dispositivo que sirve como barrera entre un peligro y alguna parte del cuerpo de una persona.

2.5.1.7. Equipo de Protección Personal.

Dispositivo que sirve como medio de protección ante un peligro y que para su funcionamiento requiere de la interacción con otros elementos. Ejemplo, sistema de detección contra caídas.

2.5.1.8. Evaluación del riesgo.

Proceso para determinar el nivel de riesgo asociado al nivel de probabilidad y el nivel de consecuencia.

Los objetivos específicos de los estudios de riesgos son:

- i. Identificar y medir los riesgos que representa una instalación industrial para personas, bienes, servicios y el medio ambiente.
- ii. Definir accidentes mayores que sean posibles y con un riesgo.
- iii. Determinar el alcance, en el espacio, de los accidentes citados en b): zonas vulnerables y daños probables.
- iv. Análisis de las causas de los accidentes.
- v. Definir medidas de prevención y protección (activa y pasiva) para evitar la ocurrencia y/o mitigar las consecuencias: disminución de la probabilidad y/o severidad de los accidentes.
- vi. Cumplir con los requisitos legales tendentes a los mismos objetivos.

2.5.1.9. Exposición.

Situación en la cual las personas se encuentran en contacto con los peligros.

2.5.1.10. Identificación del peligro.

Proceso para reconocer si existe un peligro.

2.5.1.11. Incidente.

Evento (s) relacionado (s) con el trabajo, en el (los) que ocurrió o pudo haber ocurrido lesión o enfermedad (independiente de su severidad) o víctima mortal. Un accidente es un incidente que da lugar a

una lesión, enfermedad o víctima mortal. Un incidente es en el que no hay como resultado una lesión, enfermedad, ni víctima mortal; también se puede determinar como “casi-accidente” (situación en la que casi ocurre un accidente). Una situación emergencia es un tipo particular de accidente.

2.5.1.12. Medida (s) de control.

Medida (s) implementada (s) con el fin de minimizar la ocurrencia de incidentes.

2.5.1.13. Nivel de consecuencia (NC).

Medida de severidad de las consecuencias

2.5.1.14. Nivel de deficiencia (ND).

Magnitud de la relación esperable entre (1) el conjunto de peligros detectados y su relación causal directa con posibles incidentes y (2), con la eficacia de las medidas preventivas existentes en el lugar de trabajo.

2.5.1.15. Nivel de exposición (NE).

Situación de exposición a un peligro que se presenta en un tiempo determinado durante la jornada laboral.

2.5.1.16. Nivel de riesgo.

Magnitud de un riesgo resultante del producto del nivel de probabilidad por el nivel de consecuencia.

2.5.1.17. Peligro.

Fuente, situación o acto con potencial de daño en términos de enfermedad o lesión a las personas, o una combinación de éstos.

2.5.1.18. Personal expuesto.

Número de personas que están en contacto con peligros.

2.5.1.19. Probabilidad.

Grado de posibilidad de que ocurra un evento no deseado y pueda producir consecuencias

2.5.1.20. Riesgo.

Combinación de la probabilidad de que ocurra(n) un(os) evento(s) o exposición(es) peligroso(s), y la severidad de lesión o enfermedad, que puede ser causado por el (los) evento (s) o exposición (es).

2.5.1.21. Riesgo aceptable.

Riesgo que ha sido reducido a un nivel que la organización puede tolerar, respecto a sus obligaciones legales y su propia política en seguridad y salud ocupacional.

2.5.1.22. Valoración de los riesgos.

Proceso de evaluar el (los) riesgo (s) que surge (s) de un (os) peligro (s), teniendo en cuenta la suficiencia de los controles existentes y de decidir si el (los) riesgo (s) es (son) aceptable (s) o no.

2.5.1.23. Valor límite permisible (VLP).

Concentración de un contaminante químico en el aire, por debajo del cual se espera que la mayoría de los trabajadores puedan estar expuestos repetidamente, día tras día, sin sufrir efectos adversos a la salud.

2.5.2. Métodos y Técnicas para el Análisis de Riesgos

Para abordar los estudios de riesgos y los métodos que se utilizan para hacerlos se sigue la secuencia evolutiva de los accidentes en plantas industriales. Los autores Storch De Gracia y García Martín proponen 3 tipos de estudios de riesgos que son los que siguen:

2.5.2.1. Estudios Cualitativos

Tienen como objetivo establecer la identificación de los riesgos en el origen, así como la estructura y/o secuencia con que se manifiestan cuando se convierten en accidente. Normalmente realiza un escrutinio (más o menos conducido, estructurado y/o secuencial) del proceso y de los equipos incluidos en la planta o unidad estudiada. En ocasiones son preliminares y sirven de soporte estructural para los estudios cuantitativos. El HAZOP es aplicado en el presente proyecto.

2.5.2.2. Estudios Semicuantitativos

Pretenden mediante la combinación de unos factores globales de riesgo establecer directamente el riesgo (R) o la severidad (S). Casi siempre conducen a resultados globales y relativos que sirven para comparar riesgos procedentes de plantas industriales diversas pero concretas (por ejemplo: una embotelladora de agua mineral con una refinería de petróleo con unidades, equipo y capacidad dados; dos refinerías de petróleo con unidades, equipo y capacidades dados y diferentes; un mismo proceso en dos versiones diferentes; una misma planta antes y después de modificaciones, etc.). Los factores de riesgos y las escalas para evaluarlos y analizarlos proceden de la experiencia en casos similares al que se estudie.

2.5.2.3. Estudios Cuantitativos

Tienen como objetivo recorrer por completo la línea de la evolución probable del accidente desde el origen (fallos en equipos y/a operaciones) hasta establecer la variación del riesgo (R). Son técnicas de análisis crítico que incluyen cálculos para establecer la probabilidad de sucesos complejos (siniestros) a partir de los valores individuales de la probabilidad de fallo que corresponde a los elementos (equipos y humanos) que intervienen en los procesos.

CAPITULO III

TEORÍA DE BIG DATA Y SU APLICACIÓN EN EL ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS EN EL PROCESO HVO

3.1. TEORÍA DE BIG DATA

El *Big Data* puede definirse como los datos que contienen una mayor variedad y que se presentan en volúmenes crecientes y una velocidad superior. El *big data* trabaja con todo tipo de datos, ya sea estructurados, no estructurados y semiestructurados provenientes de correos electrónicos, redes sociales, mensajería instantánea, imágenes y sensores de máquinas.

Las denominadas 4V's: Velocidad, veracidad, velocidad y variedad es parte fundamental para que la información sea considerada como *Big Data*, además de:

- ✓ Volúmenes extremadamente largos de datos.
- ✓ Habilidad de transferir datos a alta velocidad.
- ✓ Constante expansión con variedad de datos.
- ✓ Veracidad en los datos para que estos puedan representar la verdad.

3.2. DEFINICIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Está claro que el ser humano necesita buscar patrones para comprender el mundo que le rodea y anticipar ciertos comportamientos. El aumento de las interacciones entre usuarios y sistemas está generando grandes volúmenes de datos de los cuales se esperan obtener patrones que permitan predecir resultados o comportamientos con el mínimo error es el aporte de Apte (2010).

En los últimos años, se están empleando diferentes técnicas computacionales y entre ellas destaca, el denominado "*Machine Learning*" o aprendizaje automatizado, un área de la inteligencia artificial que es cada vez más importante en todos los sectores, y en específico en la industria hidrocarburífera, en numerosas aplicaciones en diferentes bloques de la industria.

El autor Alogos (2018) destaca que con frecuencia se emplean indistintamente conceptos como ciencia de datos, minería de datos, aprendizaje automático o inteligencia artificial.

Cuando se habla de *Machine Learning* se suele usar para referirse a la inteligencia artificial (como se había mencionado anteriormente el ML es una subdivisión de la IA). Lo que es pertinente destacar es que el *Machine Learning* se centra en desarrollar sistemas que aprenden o mejoren el rendimiento, en

función a los datos ingresados o coloquialmente, que se consumen. (<https://www.oracle.com/es/data-science/machine-learning/what-is-machine-learning/>)

El *Machine Learning* es una técnica que se encuentra asociada a la detección automática de patrones de gran relevancia dentro de un gran conjunto de datos.

En los últimos años, se ha convertido en una herramienta muy común en prácticamente todas las tareas que requieren extraer información a partir de grandes cantidades de datos (Shalev S. & David B., 2014).

Algo que debemos de denotar en nuestro día a día, es que la tecnología basada en el *Machine Learning* ya se encuentra presente entre las actividades cotidianas como ser: el filtrado de correos electrónicos, los sistemas de recomendaciones, la detección facial y el reconocimiento del habla en el *smartphone*, la detección y previsión del tiempo atmosférico, la consulta del tráfico en la carretera, entre otros.

Es por la complejidad de todas estas aplicaciones, que el ser humano no es capaz de programar una serie de especificaciones concretas para la realización, completación o absolución de dichas tareas, sino que tiene que dotar a las propias computadoras con la habilidad de aprender de la experiencia y de adaptarse a las nuevas situaciones. (Shalev S. & David B., 2014).

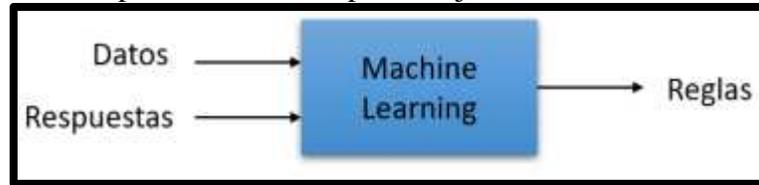
3.3. EL APRENDIZAJE

En un sistema de *Machine Learning*, el aprendizaje consiste en el ajuste de los parámetros de un modelo en función a los datos que va recibiendo este. Este conjunto de datos recibe el nombre, como ya lo habíamos mencionado en un punto anterior, de *data set*, el cual contiene variables independientes como dependientes. Las variables independientes son aquellas columnas de la *data set* usadas por el algoritmo para generar un modelo que prediga lo mejor posible las variables dependientes. Por otro lado, las variables dependientes son las columnas de la *data set* resultado de una correlación entre las variables independientes.

La ventaja del *Machine Learning* es que estas reglas pueden aplicarse a diferentes datos de entrada para producir respuestas que han sido generadas automáticamente

por lo que el sistema aprendió y no por las instrucciones generadas por un humano (Chollet, 2017).

Figura 3.1. Representación del aprendizaje utilizando machine learning.



Fuente: Hozz, 2015.

El modelo debe estar lo suficientemente ajustado a los datos de entrada, pero también debe tener la suficiente consistencia como para dar un buen resultado ante la introducción de datos diferentes. Para ello, el *data set* se divide en dos subconjuntos de datos: los datos de entrenamiento (*training data*), que corresponden aproximadamente al 80% de la *data set* y los datos de test (*test data*), que corresponden al 20% restante y se emplearán para medir la calidad del modelo tras el entrenamiento (Esteve, 2017)

Una vez se tienen los datos se necesita establecer una hipótesis, es decir, encontrar una ecuación que se aproxime lo mejor posible al comportamiento real del fenómeno que se está modelizando. Esta ecuación es la que relaciona los datos de entrada y los parámetros del modelo con la salida. Aquello que no se mide no se puede mejorar, así que el siguiente paso consiste en encontrar el error en la predicción y tratar de minimizarlo (Santana, 2017).

3.4. EL ERROR Y LOS PROBLEMAS DE AJUSTE

Lo principal que es de destacar del *Machine Learning* es la precisión y la capacidad de generalizar un modelo, estos dos aspectos son esenciales a la hora de realizar un modelado en *machine learning*, pero es imposible conseguir un modelo esté libre de errores. Comprender las principales fuentes del error ayuda a prevenir los problemas más comunes, como ser: el sobreajuste y el subajuste.

Los errores principales en la predicción de un modelo y que están asociados al algoritmo empleado son la varianza y el sesgo (*bias*). Existe un tercer tipo de error asociado a la cantidad de ruido de los datos de entrada, sobre el cual no se puede actuar porque es irreducible e independiente de lo bueno que sea el modelo (González, 2018).

El error de varianza está relacionado con el grado en el que la función objetivo cambia según los datos de entrenamiento proporcionados. Existen algoritmos que se ven muy influenciados por pequeñas variaciones en los datos de entrada, mientras que otros son más consistentes y absorben mejor estos cambios (González, 2018).

El subajuste (*underfitting*) se refiere a un modelo con un nivel de complejidad muy bajo que no tiene la precisión suficiente como para alcanzar un ajuste adecuado debido a su alto sesgo. Puede ocurrir cuando el conjunto de datos de entrenamiento no es suficiente, o cuando se utiliza un modelo lineal para ajustar datos no lineales. Por otra parte, el sobreajuste (*overfitting*) se produce cuando el nivel de complejidad es elevado y, por lo tanto, el modelo no tiene la capacidad de generalizar su comportamiento ante diferentes datos de entrada. Sucede cuando el modelo recoge el ruido de los datos de entrenamiento y, en consecuencia, aumenta mucho su varianza (Santana, 2019).

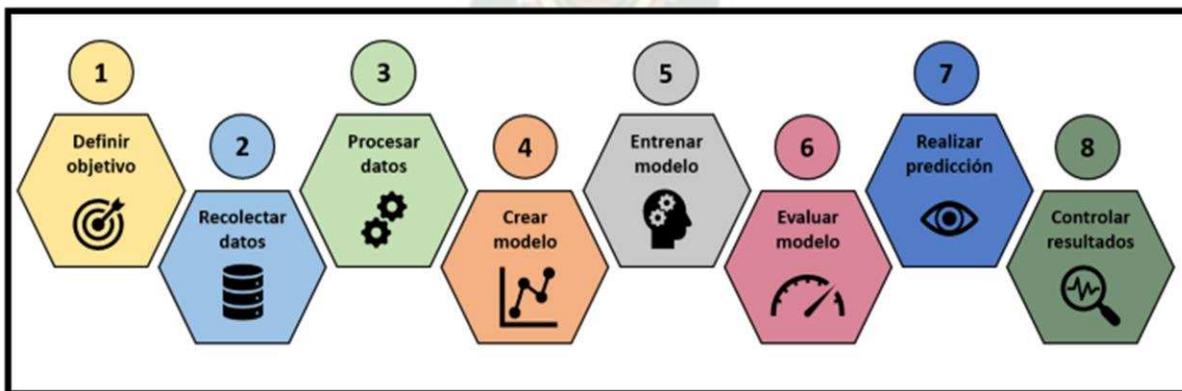
El problema más común es el del sobreajuste (*overfitting*), para el cual existen dos tipos de soluciones. La primera consiste en reducir el número de variables independientes (*features*), ya sea manualmente mediante la observación de aquellas variables que podrían desecharse, o bien a través de métodos que realizan esta tarea automáticamente. Sin embargo, se corre el riesgo de perder información realmente útil para el comportamiento del modelo. Por eso, la segunda opción es la regularización, gracias a la cual se mantiene el número de variables a costa de reducir el valor de los parámetros que afectan a las variables.

3.5. ETAPAS DE UN PROYECTO DE MACHINE LEARNING

Bajo algunos conceptos básicos presentados en puntos anteriores, el *machine learning* dispone de un procedimiento para dar solución a problemas reales. Es de recalcar que no se centra únicamente en elegir un modelo y entrenarlo, sino que, como todo proyecto, cuenta con una serie de etapas o pasos a seguir para aumentar las probabilidades de éxito.

La figura 3.2. Es una representación de los procedimientos seguidos en un proyecto empleando *machine learning*.

Figura 3.2. Etapas Genéricas para Llevar a Cabo un Proyecto de Machine Learning



Fuente: Hozz, 2015.

- ✓ **Primera etapa.** Consiste en entender el problema que se quiere resolver, ya que gran parte de las decisiones tomadas a lo largo del proyecto dependerán de lo bien que se haya comprendido el contexto (Sánchez, 2019).
- ✓ Para ello es necesario definir unos objetivos claros, específicos, medibles y alcanzables en un periodo determinado de tiempo. Es una fase tediosa en la que se requiere mucha información por parte de expertos en el sector sobre el que se va a trabajar (Martínez, 2018).
- ✓ **Segunda etapa.** Se define la cantidad y el tipo de datos necesarios, así como el origen de dichos datos. La calidad de los datos que alimentan la máquina tiene un impacto directo en el funcionamiento del modelo (Bagnato, 2017).
- ✓ En algunos casos, no se dispone de todos los datos necesarios para resolver el problema, por lo que se compran a entidades externas. Aun así, en otros muchos casos no se puede acceder a los datos deseados porque ni siquiera existen (Velogig, 2018).
- ✓ **Tercera etapa.** Es el tratamiento de los datos una vez recolectados. El objetivo principal de esta etapa es visualizar y analizar cuáles son las variables que mejor representan aquello que se quiere predecir (Sánchez, 2019).
- ✓ **Cuarta etapa.** Define por completo el modelo que mejor se ajuste al problema: regresión lineal, árbol de decisiones, red neuronal, k-vecinos más cercanos, entre otros.
- ✓ **Quinta etapa.** Se dedica al entrenamiento del modelo a partir de los datos de entrenamiento. Los parámetros se ajustan automáticamente por el algoritmo seleccionado a medida que se entrena el modelo (Bagnato, 2017).
- ✓ **Sexta etapa.** Se verifica la precisión del modelo mediante la introducción de los datos de test, que son datos que la máquina aún no conoce. Un 50% de precisión es insuficiente para validar un modelo, pues indica que la mitad de las veces fallará. En cambio, alcanzar un 90% de precisión proporciona una confianza suficiente. También se evalúan los errores que hacen que el modelo no generalice bien con el fin de elegir la solución más conveniente: adquirir más datos, usar un modelo más simple, usar uno más complejo, comprender mejor el problema, etc. A esta etapa también se la conoce como *Parameter Tuning* (configuración de parámetros), pues consiste en ajustar los parámetros del modelo para mejorar los resultados obtenidos (Bagnato, 2017).
- ✓ **Séptima etapa.** Se realiza la predicción aplicando los modelos predictivos que existen dentro del sistema de machine learning, los cuales muestran gráficas de las variables en estudio, representando sus variaciones máximas y mínimas y su comportamiento en el futuro.

- ✓ **Octava etapa.** Pone fin al proceso con la monitorización de los resultados. Es necesario asegurar que el modelo aporta un alto valor predictivo y, lo más importante, que cumple con los objetivos marcados en la primera etapa (Sánchez, 2019).

3.6. MINERÍA DE DATOS

La minería de datos es la conjunción de la Estadística y el *Big Data*. La misma está basada en los principios básicos de la estadística. Puede definirse como el proceso de explorar y analizar grandes cantidades de datos para descubrir patrones entre ellos, a través de programas de búsqueda e identificación de patrones y relaciones globales.

Un ejemplo de la aplicación de la Minería de Datos es el siguiente: Suponga que un mercadólogo está interesado en conocer las características de las personas que respondieron a una promoción contra aquellos que no respondieron a ésta, la Minería de Datos se utilizaría para extraer de los datos las diferencias entre las dos clases y analizar cada una de sus características. El mercadólogo podría querer predecir quien respondería satisfactoriamente a la promoción, sin embargo, como se dijo la MD no se encarga, para realizar esta tarea necesitamos de la intervención humana. MD solo apoya a las decisiones tomadas por el mercadólogo, aquí es donde entra el ML para realizar un proceso automático sin la intervención humana. (Hozz, 2015)

3.7. ALGORITMOS DE MACHINE LEARNING

Los algoritmos, esencialmente son motores que impulsan el *Machine Learning* y los principales son:

- ✓ Aprendizaje supervisado.
- ✓ Aprendizaje no supervisado.
- ✓ Aprendizaje reforzado.

a. Aprendizaje supervisado

En el aprendizaje supervisado, el agente observa pares de datos de entrada y salida a modo de ejemplo para aprender una función que modele la salida según la entrada (Russell & Norvig, 2010).

Por lo tanto, en los datos utilizados para construir el modelo se encuentra la información que se desea predecir. Existen dos tipos de problemas en el aprendizaje supervisado: los problemas de regresión y los problemas de clasificación, fundamentalmente, un modelo de regresión predice una cantidad continua mientras que un modelo de clasificación predice una etiqueta (Management Solutions España, 2018).

b. Aprendizaje No supervisado

El aprendizaje no supervisado divide en segmentos los datos con características similares llamados clusters. A los datos se les asignan distintos parámetros para después poder clasificarlos, en este punto se puede decir que se vuelve una especie de aprendizaje supervisado. Las aplicaciones de este tipo de algoritmos también son muy variadas, pero es menos utilizado porque la complejidad de estos algoritmos es mayor a la de los algoritmos de aprendizaje supervisado. (Management Solutions España, 2018).

Una de las principales aplicaciones del aprendizaje no supervisado es el de identificar grupos de amigos cercanos en redes sociales, Twitter, Instagram y Facebook tienen una cosa en común: la gran cantidad de datos no etiquetados que generan sus millones de usuarios. Entender el significado de todos estos datos no es una tarea fácil, estas grandes empresas utilizan algoritmos capaces de encontrar patrones y agrupar todos estos datos.

c. Aprendizaje Forzado

Los algoritmos de aprendizaje reforzado son algoritmos que reciben retroalimentación a partir del análisis de los datos que realiza, así los analistas de datos pueden guiarlo y asegurarse de obtener mejores resultados. Puede sonar parecido al aprendizaje supervisado porque al igual que éste tiene intervención humana, la diferencia radica en que este tipo de algoritmos no está entrenado con un conjunto de datos de muestra. El sistema aprende a base de prueba y error, en cierto punto se puede decir que es una combinación del aprendizaje supervisado y el no supervisado, porque tiene intervención humana, pero solo al final del proceso, durante el proceso el sistema realiza todo sin alguna intervención humana. (Russell & Norvig, 2010).

CAPITULO IV

INGENIERÍA DEL PROYECTO

4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE HIDROTRATAMIENTO DE ACEITES

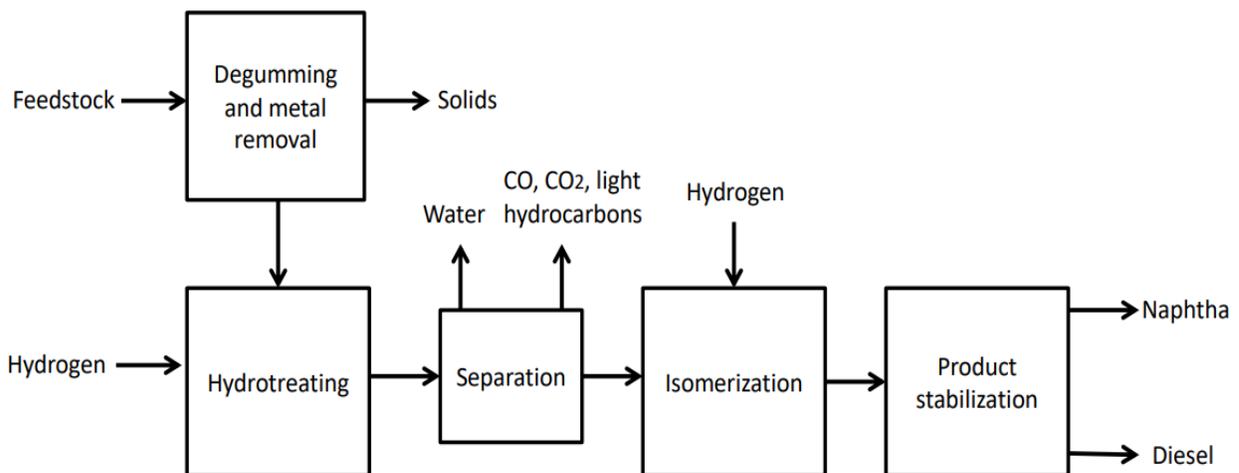
VEGETALES.

4.1.1. Tecnologías para el proceso HVO

Las dos tecnologías principales para el hidrotreatmento de aceites vegetales son NExBTL® de Neste Oil y Ecofining™ de UOP y ENI. El esquema básico para ambos es bastante similar. Otras empresas, como Axens IFP o Haldor Topsoe, también han desarrollado tecnologías similares con el nombre de Vegan™ e Hydroflex™.

En el presente trabajo se utilizará la tecnología NExBTL® de Neste Oil. En la figura 4.1 se muestra el diagrama de bloques del proceso de hidrotreatmento de aceites vegetales. El proceso abarca desde el desgomado y remoción de metales, hidrotreatmento con hidrogeno, separación (para eliminar el agua el monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarburos livianos), isomerización con hidrogeno hasta la estabilización de los productos finales (nafta y diésel).

Figura 4.1. Diagrama de bloques para el proceso NExBTL®



Fuente. Moreno-Hurtado, 2018

4.1.1.1. Materias Primas

La Planta de Diésel Renovable HVO (de aceite vegetal hidrotreatmentado) producirá 9.000 barriles por día (unos 1,42 millones de litros) a partir de la gestión 2028.

El 22 de enero de 2023, el presidente Luis Arce mediante el Ministerio De Hidrocarburos, indicó que el Gobierno nacional invertirá Bs. 1660 millones para la construcción de tres plantas extracción de aceite de palma, una planta de extracción de aceites de macororó y jatropha, y cuatro centros de acopio y procesamiento de aceites y grasas usadas, que proveerán la materia prima para la producción de diésel ecológico.

El viceministro De Industrialización, Comercialización, Transporte Y Almacenaje De Hidrocarburos, William Donaire anuncio este 7 de marzo de 2023 que habrá plantaciones en Pando, Tarija y Santa Cruz, las cuales proveerán a la factoría cruceña.

En el presente trabajo todos los diseños, procesos y cálculos se realizaron tomando como única materia prima al aceite de palma. Este aceite está compuesto por un 50% de ácidos grasos saturados y un 50% de insaturados, principalmente ácido palmítico y ácido oleico, respectivamente. Este aceite es una mezcla de triglicéridos en diferentes proporciones. En la tabla 4.1 se muestran la formula molecular y su estructura de sus componentes.

El aceite de palma no está clasificado como peligroso según el Reglamento (EU) No 1272/2008 del Parlamento Europeo (2008). En condiciones de uso normal y en su forma original, el producto no tiene efectos negativos para la salud y el medio ambiente. Este producto no requiere medidas especiales de manipulación segura y almacenamiento. Como condiciones generales de almacenamiento se deben evitar fuentes de calor, radiaciones, electricidad y el contacto con alimentos. Almacenar los envases entre 5 y 35 °C, en un lugar seco y bien ventilado.

En el caso de ocurrir un incendio a causa del aceite las medidas de lucha contra incendios los modos de extinción son: espuma, polvo seco, dióxido de carbono, arena o tierra. Y la peor opción para extinguir un incendio de este producto es el agua.

Tabla 4.1. Componentes y fracciones molares del aceite de palma

COMPONENTES	FORMULA MOLECULAR	ESTRUCTURA	FRACCIÓN MOLAR
TRIOLEINA	$C_{57}H_{104}O_6$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COO}-\text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COO}-\text{CH} \\ \\ \text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COO}-\text{CH}_2 \end{array}$	0,4628
TRIPALMITINA	$C_{51}H_{98}O_6$	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{O}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_{14}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CHO}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_{14}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2\text{O}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_{14}-\text{CH}_3 \end{array}$	0,4197
TRISTEARINA	$C_{57}H_{110}O_6$	$\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-(\text{CH}_2)_{16}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-(\text{CH}_2)_{16}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-(\text{CH}_2)_{16}-\text{CH}_3 \end{array}$	0,0375
TRILINOLEINA	$C_{57}H_{98}O_6$	$\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}_3 \end{array}$	0,0800

Fuente: Moreno-Hurtado, 2018

4.1.1.2. Pre Tratamiento de la Materia Prima

Antes de entrar en el reactor de hidrotatamiento, la materia prima debe pasar por una unidad de purificación para eliminar las impurezas y los metales que contenga. El pre tratamiento es indispensable, para que metales (Ca, Mg) y el fósforo no interfieran con los catalizadores del reactor.

La unidad de pre tratamiento se basa en una unidad de blanqueo, y sus condiciones de funcionamiento varían en función del tipo de materia prima.

El blanqueo se efectúa por desgomado con adición de un ácido H_3PO_4 , neutralización con NaOH y lavado con agua desmineralizada. Para reducir aún más el nivel de impurezas, la materia prima puede alimentarse a través de sílice y/o tierra de blanqueo según Oil (2012).

Los aceites vegetales se componen principalmente de triglicéridos, que son estructuras de hidrocarburos que contienen tres cadenas de ácidos grasos y un glicerol en forma de éster. El procesamiento de estos triglicéridos (I) Saturación de dobles enlaces en las cadenas de hidrocarburos. (II) separación de la columna vertebral de glicerol en forma de propano, y (III) Eliminación de las moléculas de oxígeno mediante reducción con hidrógeno.

4.1.1.3. Desoxigenación de aceites vegetales

La mayor parte de la literatura sobre el procesamiento de aceites vegetales se centra principalmente en su desoxigenación. Esto se debe al reciente interés despertado en los procesos de hidrotratamiento de en los últimos años, pero también porque las empresas mantienen cuidadosamente la información segura y alejada de los ojos de la competencia. Como resultado, hay muchas preguntas sobre el mecanismo de este proceso: cinética de reacción, uso del catalizador y desactivación, diseño y condiciones del reactor.

4.1.1.4. Condiciones del Reactor

Al controlar la desoxigenación, las principales variables del reactor y condiciones son: temperatura, presión, relación H_2 /aceite y velocidad del líquido espacial por hora (LSHV).

En un estudio particular, Bezergianni concluyó que el aumento de la temperatura del reactor por encima de 360 °C se tradujo en un grado indeseable de agrietamiento.

En otro estudio, Srifa experimentado con un amplio rango de condiciones de hidrotratamiento para aceite de palma sobre un sulfurado catalizador $NiMo/Al_2O_3$. Los resultados apoyan la hipótesis que, bajo 300 °C, la conversión parcial de los triglicéridos tomada lugar, mientras que el craqueo y la isomerización descomponen el diésel moléculas por encima de 360 °C.

En cuanto a relaciones H_2 /aceite, 3 a 5 veces el consumo teórico se recomienda para asegurar la transferencia de masa de gas a líquido la resistencia del hidrogeno no juega un papel de interferencia en el proceso.

Los valores de LSHV, por otro lado, pueden variar entre 1 a 5 h^{-1} , afirma Graca (2012), aunque los valores más altos podrían afectar el nivel de conversión.

4.1.1.5. Tipo De Reactor

Los reactores usados en este proceso son muy probablemente del mismo tipo de reactores como los que se utilizan en las unidades de desulfuración de hidrotratamiento, esto es, reactores de lecho de goteo.

Los reactores de lecho de goteo son excelentes opciones cuando se trata de reacciones heterogéneas donde las fases líquida y gaseosa (principalmente hidrógeno) entran en contacto sobre un lecho de catalizador a altas temperaturas y presiones según Satterfield (1975).

En comparación con otros reactores heterogéneos, los lechos de goteo ofrecen bajas tasas de transferencia de calor, lo que lleva a la temperatura radial gradientes y la formación de puntos calientes. A fin de evitar esta situación, el reactor puede contar con enfriamiento entre etapas sistemas, camisas de refrigeración o, en casos más extremos, estar diseñado como un reactor multitubular según Jecz-mionek (2014) presenta una utilidad estudio sobre el calor de las reacciones involucradas en el hidrotratamiento de aceites vegetales.

Los modelos de lecho de goteo se revisaron minuciosamente para desarrollar un modelo de reactor lo suficientemente robusto y complejo para predecir con bastante exactitud el funcionamiento en una planta de hidrotratamiento para aceites vegetales según Korsten (1996).

4.1.1.6. Isomerización

La isomerización tiene lugar una vez que los productos gaseosos y el agua formados durante la desoxigenación se separan. Como se mencionó en el capítulo 2, metales nobles como Pt sobre soportes de zeolita SAPO son típicamente usados en esta operación.

Las temperaturas y presiones son similares a las de la desoxigenación, e incluso si el hidrógeno se consume en pequeñas cantidades, la reacción solo puede tener lugar a una alta presión de hidrogeno.

4.1.2. Diseño del Proceso

El proceso consta en tres áreas operativas: hidrotratamiento, isomerización y separación de fluidos. Previamente, el aceite de palma se purifica en una planta de pretratamiento, donde se somete a desgomado y blanqueo para eliminar metales, fósforo y cualquier partícula sólida que pueda afectar al catalizador negativamente.

Después de la purificación, el aceite de palma ingresa al reactor de *hidrotratamiento o desoxigenación*, que es un reactor de lecho de goteo con lechos catalíticos dispuestos en serie para enfriamiento intermedio con hidrógeno. El catalizador está hecho de NiMo soportado sobre alúmina y la conversión es casi total.

Los productos líquidos obtenidos en el reactor de hidrotratamiento son principalmente n-alcenos en el rango de ebullición del diésel (270-320 °C), lo que resulta en un producto con alto número de cetano pero de propiedades de flujo en frío deficientes. Para mejorar la calidad del producto, es imprescindible que la mezcla entre en un segundo reactor.

El reactor de *isomerización* opera de manera similar al reactor de hidrotratamiento, esto es, a altas temperaturas y presiones y con considerable suministro de hidrógeno gaseoso. En este caso, el lecho del catalizador se hace de Pt (platino) soportado en una zeolita SAPO y alúmina. Cualquier triglicérido que no han reaccionado en el reactor de hidrotratamiento terminarán así de reaccionar aquí.

Mejorar las propiedades de flujo en frío del producto viene a expensas del inevitable agrietamiento (cracking) del diésel, que produce cantidades variables de mezclas de bajo punto de ebullición, como el chorro combustible y nafta, dependiendo de las condiciones del reactor.

Las mezclas resultantes se separan en una torre de destilación. Donde se obtienen naftas y diésel como producto de fondo, y el combustible para aviones se obtiene a través de una columna lateral. De esta manera, el proceso es lo suficientemente flexible para producir cantidades variables de productos diferentes al diésel verde, dependiendo sobre la demanda del mercado.

Además, dado que el hidrógeno está presente en grandes cantidades en ambos reactores, pero no se consume totalmente, una unidad de amina es considerada como la mejor opción para recuperar y reciclar la mayor parte, ya que, así como los hidrocarburos ligeros y contaminantes (CO_2 , y CO principalmente) presentes en los flujos gaseosos que se obtienen presentes en los flujos gaseosos que se obtienen en los tanques de expansión situados después de cada reactor.

4.1.2.1. Simulación del Hidrotratamiento de Aceite de Palma

Para el análisis de funcionalidad de operabilidad HAZOP y para construir una matriz de riesgos es fundamental conocer profundamente el proceso además de los datos termodinámicos de las materias primas para facilitar el análisis causa/desviación/consecuencia.

Con el fin de realizar un análisis de riesgos en cada área operativa de la nueva planta HVO se simuló proceso de hidrotratamiento con el software Aspen Plus V11 en base a:

- Datos obtenidos de reporte de La Razón (2023).

Producción planta diésel renovable: 9000 bbl/día

Masa de materia prima por día: 1800 TM/día

- Datos complementarios obtenidos del student book de Moreno-Hurtado (2018).

Densidad del aceite de palma: 890 kg/m³

LSHV = 3 h⁻¹ (numero de cambios que experimenta el reactor en 1 hora)

Cálculo del flujo másico y volumétrico del aceite palma por hora

$$\dot{m} = 1800 \frac{TM}{d} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 TM} * \frac{1 d}{24 h} \quad \text{por lo tanto} \quad \dot{m} = 73666 \frac{\text{kg}}{h}$$

Dividiendo el flujo másico entre la densidad obtenemos el flujo volumétrico

$$\dot{V} = \frac{73666 \frac{\text{kg}}{h}}{890 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 82.77 \frac{\text{m}^3}{h} * \frac{1000 L * 1 \text{ bbl} * 24 h}{1 \text{ m}^3 * 159 L * 1 d} \quad \text{por lo tanto} \quad \dot{V} = 12493.7 \frac{\text{bbl}}{d}$$

Cálculo del volumen de reactor

Se hace calcula con la siguiente ecuación 4.1:

$$LSHV = \frac{Q}{v_r}$$

(4.1)

Donde:

LSHV = numero de cambios que experimenta el reactor en 1 hora

v_r = volumen del reactor

Q = caudal volumétrico

$$v_r = \frac{82.77 \frac{\text{m}^3}{h}}{3 \text{ h}^{-1}} = 29.6 \text{ m}^3 * \frac{1000 L * 1 \text{ bbl}}{1 \text{ m}^3 * 159 L} \quad \text{por lo tanto} \quad v_r = 186.16 \text{ bbl}$$

4.1.2.1.1. Programación del proceso de hidrot ratamiento

En el proceso de hidrot ratamiento para obtener diésel verde a partir de aceites vegetales se distinguen 3 áreas operativas: área de hidrot ratamiento, área de isomerización y área de separación de fluidos.

4.1.2.1.1. 1. Condiciones operativas del sector hidrot ratamiento

Fue necesario para el modelado y simulación del proceso de hidrot ratamiento del aceite vegetal de palma recurrir a datos de parámetros de operación presentados en las investigaciones: primero “Comparación de Métodos de Producción de Biodiésel de Primera y Segunda Generación a partir de Aceite

de *Jatropha*” de Sotelo Boyas (2008) y segundo de la investigación “Diseño preliminar para la producción de diésel verde mediante el proceso de hidrotratamiento de aceites vegetales” de Moreno-Hurtado (2018). Los parámetros de funcionamiento del reactor del área de hidrotratamiento se encuentran en la tabla 4.2. Las condiciones de presión, temperatura y flujo masico en la alimentación de aceite de palma e hidrogeno se presentan en la tabla 4.3.

Tabla 4.2. Parámetros de operación del reactor de hidrotratamiento

REACTOR 1 (REACTOR HIDROTRATAMIENTO)	
PRESIÓN DE TRABAJO	60 bar
TEMPERATURA DE TRABAJO	360°C
TIPO	Lecho de goteo

Fuente: Moreno-Hurtado, 2018

Tabla 4.3. Alimentación de aceite de palma al reactor e hidrogeno de hidrotratamiento

Alimentación de aceite de palma al reactor 1	
PRESIÓN	1 bar
TEMPERATURA	60 °C
FLUJO MÁSSICO	$73666 \frac{kg}{h}$
Alimentación de hidrogeno al reactor 1	
PRESIÓN	20 bar
TEMPERATURA	50 °C
FLUJO MÁSSICO	$2600 \frac{kg}{h}$

Fuente: Moreno-Hurtado, 2018

4.1.2.1.1. 2. Condiciones operativas del sector isomerización

Al reactor de isomerización también se alimenta hidrogeno para que las moléculas de aceite vegetal que no reaccionaron en el primer reactor terminen su conversión en éste. Ocurre el cracking de las cadenas largas de alcanos y alquenos producidos en la fase de hidrotratamiento. Durante la isomerización se producen los primeros productos finales: GLP verde y otros productos livianos. La tabla 4.4. detalla las variables de funcionamiento del segundo reactor.

Tabla 4.4. Parámetros de operación del reactor de isomerización

REACTOR 2 (REACTOR ISOMERIZACIÓN)	
PRESIÓN DE TRABAJO	40 bar
TEMPERATURA DE TRABAJO	360°C
TIPO	Lecho de goteo

Fuente: Moreno-Hurtado, 2018

4.1.2.2. Procedimiento de la Programación

La figura 4.2. muestra los componentes usados. No olvide especificar la estructura molecular de los componentes ya que existen isómeros y cadenas extensas ramificadas de carbono e hidrógeno.

Figura 4.2. Componentes del proceso de hidrot ratamiento en la simulación

Component ID	Type	Component name	Alias
TRIOLEIN	Conventional	TRIOLEIN	C57H104O6
TRIPAL	Conventional	TRIPALMITIN	C51H98O6
TRISTEAR	Conventional	GLYCEROL-TRISTEARATE	C57H110O6
TRILINO	Conventional	TRILINOLEIN	C57H98O6
NAOH	Conventional	WATER	H2O
WATER	Conventional	WATER	H2O
H3PO4	Conventional	WATER	H2O
NA3PO4	Conventional	WATER	H2O
H2	Conventional	HYDROGEN	H2
C16H34	Conventional	N-HEXADECANE	C16H34
C18H38	Conventional	N-OCTADECANE	C18H38
C15H32	Conventional	N-PENTADECANE	C15H32
C17H36	Conventional	N-HEPTADECANE	C17H36
C3H8	Conventional	PROPANE	C3H8
CO2	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2
H2O	Conventional	WATER	H2O
IC15	Conventional	N-PENTADECANE	C15H32
IC16	Conventional	N-HEXADECANE	C16H34
IC17	Conventional	N-HEPTADECANE	C17H36
IC18	Conventional	N-OCTADECANE	C18H38
C4H10	Conventional	N-BUTANE	C4H10-1
C5H12	Conventional	N-PENTANE	C5H12-1
C6H14	Conventional	N-HEXANE	C6H14-1
C7H16	Conventional	N-HEPTANE	C7H16-1
C8H18	Conventional	N-OCTANE	C8H18-1
C9H20	Conventional	N-NONANE	C9H20-1

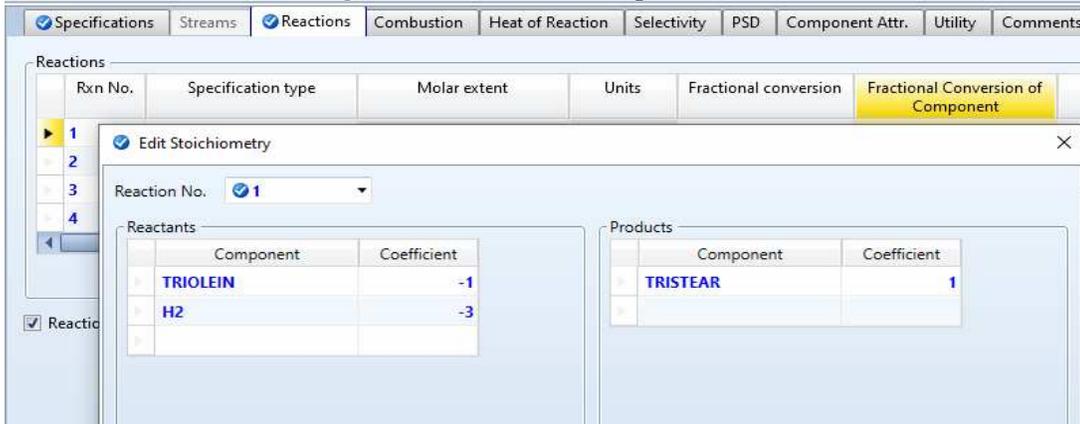
Fuente: Simulación con Aspen Plus v11, 2023

Sigue definir las estructuras en la pestaña “Molecular Structure”, el orden y posicionamiento de cada átomo en la molécula de cada componente presente en la materia prima. Una vez realizado el paso anterior para cada componente en las corrientes, se define el modelo termodinámico “NTRL”

La corriente de hidrogeno se ingresa con un 20 % de exceso según Moreno-Hurtado (2018) con los valores de P, T y flujo másico establecidas en la tabla 4.4. De la misma manera la corriente de aceite de palma ingresa con los parámetros de la tabla 4.3.

En la Figura 4.3 se observa la pestaña de “Reactions” del software Aspen plus donde el software calcula los coeficientes estequiométricos para el balance de materia en la reacción de hidrogenación. Los coeficientes estequiométricos para la reacción de la trioleina con hidrogeno y producto de esta reacción es otro triglicérido llamado triestearina. El coeficiente estequiométrico para la trioleina es 1 (uno), para el hidrogeno es 3 (tres) y para el producto es decir la triestearina es 1 (uno).

Figura 4.3. Balance estequiométrico



Fuente: Simulación con Aspen Plus v11, 2023

Se definió una conversión de 1 para el reactivo limitante en las reacciones para que los componentes deseados a la salida del reactor sean los establecidos por la reacción de hidrogenación, se calculó el balance estequiométrico para cada uno de los componentes del aceite de palma. La figura 4.4. muestra los coeficientes estequiométricos de todas las reacciones de hidrogenación.

Figura 4.4. Reacciones de hidrogenación

Rxn No.	Specification type	Molar extent	Units	Fractional conversion	Fractional Conversion of Component	
1	<i>Frac. conversion</i>		kmol/hr	1	TRIOLEIN	TRIOLEIN + 3 H2 --> TRISTEAR(MIXED)
2	<i>Frac. conversion</i>		kmol/hr	1	TRILINO	TRILINO + 6 H2 --> TRISTEAR(MIXED)
3	<i>Frac. conversion</i>		kmol/hr	1	TRISTEAR	TRISTEAR + 7.5 H2 --> 1.5 C18H38(MIXED) + 1.5
4	<i>Frac. conversion</i>		kmol/hr	1	TRIPAL	TRIPAL + 7.5 H2 --> 1.5 C16H34(MIXED) + 1.5 C1

Fuente: Simulación con Aspen Plus v11, 2023

La figura 4.5. muestra la composición de los productos de la reacción de isomerización. Ejecutando la simulación se observa los resultados preliminares en la unidad de isomerización, con los flujos a la salida del reactor 2. Entre los productos finales se obtienen flujos masicos de alcanos en fase liquida como: octadecano = $19144,8 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)$; heptadecano = $18089,6 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)$ y pentadecano = $11557 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)$.

Figura 4.5. Composición de los productos del reactor de isomerización

Material	Heat	Load	Vol.% Curves	Wt. % Curves	Petroleum	Polymers	Solids			
								Units		
								H2REC		
								LIQ2		
								COMP		
C18H38								0	19144.8	76.5792
C15H32								0	11557	115.57
C17H36								0	18089.6	180.896
C3H8								0	0	0
CO2								0	0	0
H2O								0	0	0
IC15								0	0	10401.3
IC16								0	0	11088.1
IC17								0	0	16280.7
IC18								0	0	18379
C4H10								0	0	233.009
C5H12								0	0	289.241
C6H14								0	0	345.473
C7H16								0	0	401.704
C8H18								0	0	569.804
C9H20								0	0	572.057
C10H22								0	0	570.4
C11H24								0	0	626.632
C12H26								0	0	474.345
C13H28								0	0	332.854
C14H30								0	0	89.5446

Fuente: Simulación con Aspen Plus v11, 2023

La figura 4.10 muestra el cálculo mediante el software Aspen Plus del número de etapas o platos internos en la torre, el plato por donde ingresara la alimentación y su razón de reflujo. Y se estableció los cortes salientes de la torre con la fase y etapa correspondiente. El resultado indica que la torre destiladora estará compuesta de 22 platos y el 8vo (octavo) plato es el de la alimentación.

Figura 4.6. Cálculo de numero de platos de la torre de destilación

Configuration										
Streams										
Pressure										
Condenser										
Reboiler										
3-Phase										
Comments										
Feed streams										
	Name	Stage	Convention							
	FEED	8	Above-Stage							
Product streams										
	Name	Stage	Phase	Basis	Flow	Units	Flow Ratio	Feed Specs		
	LIGHTS	1	Vapor	Mole		kmol/hr		Feed basis		
	DIESEL	22	Liquid	Mole		kmol/hr		Feed basis		
	NAPTHA	1	Liquid	Mole		kmol/hr		Feed basis		
Pseudo streams										
	Name	Pseudo Stream Type	Stage	Internal Phase	Reboiler Phase	Reboiler Conditions	Pumparound ID	Pumparound Conditions	Flow	Units

Fuente: Simulación con Aspen Plus v11, 2023

Mediante el software las presiones de tope y fondo de la torre fueron calculadas a condiciones atmosféricas. Los resultados son: temperatura del condensador (26 °C) y su presión de fondo (1 bar). Para finalizar esta etapa se configuro el reboiler. La tabla 4.5. resume las condiciones de operación de la torre destiladora.

Tabla 4.5. Condiciones de operación de la torre destiladora

TORRE DE DESTILACIÓN (SEPARACIÓN DE FLUIDOS)	
NUMERO DE PLATOS	22
PLATO DE ALIMENTACIÓN	8 vo
PRESIÓN	1 bar
TEMPERATURA	26 °C

Fuente: Simulación con Aspen Plus V11, 2023

Se ejecutó la simulación para verificar la separación de los productos finales. En la figura 4.7. y se resume la separación de los componentes y las cantidades de sus flujos masicos a s salida expresados en kilogramos por hora. Los productos de la línea de flujo de productos pesados (diésel) son: do decano, iso-pentadecano, pentadecano, iso-hexadecano, hexadecano, iso-heptadecano, heptadecano, iso-octadecano y octadecano. Los productos de la línea de productos livianos (nafta) son: butano, pentano, hexano, heptano, octano, nonano, decano y undecano.

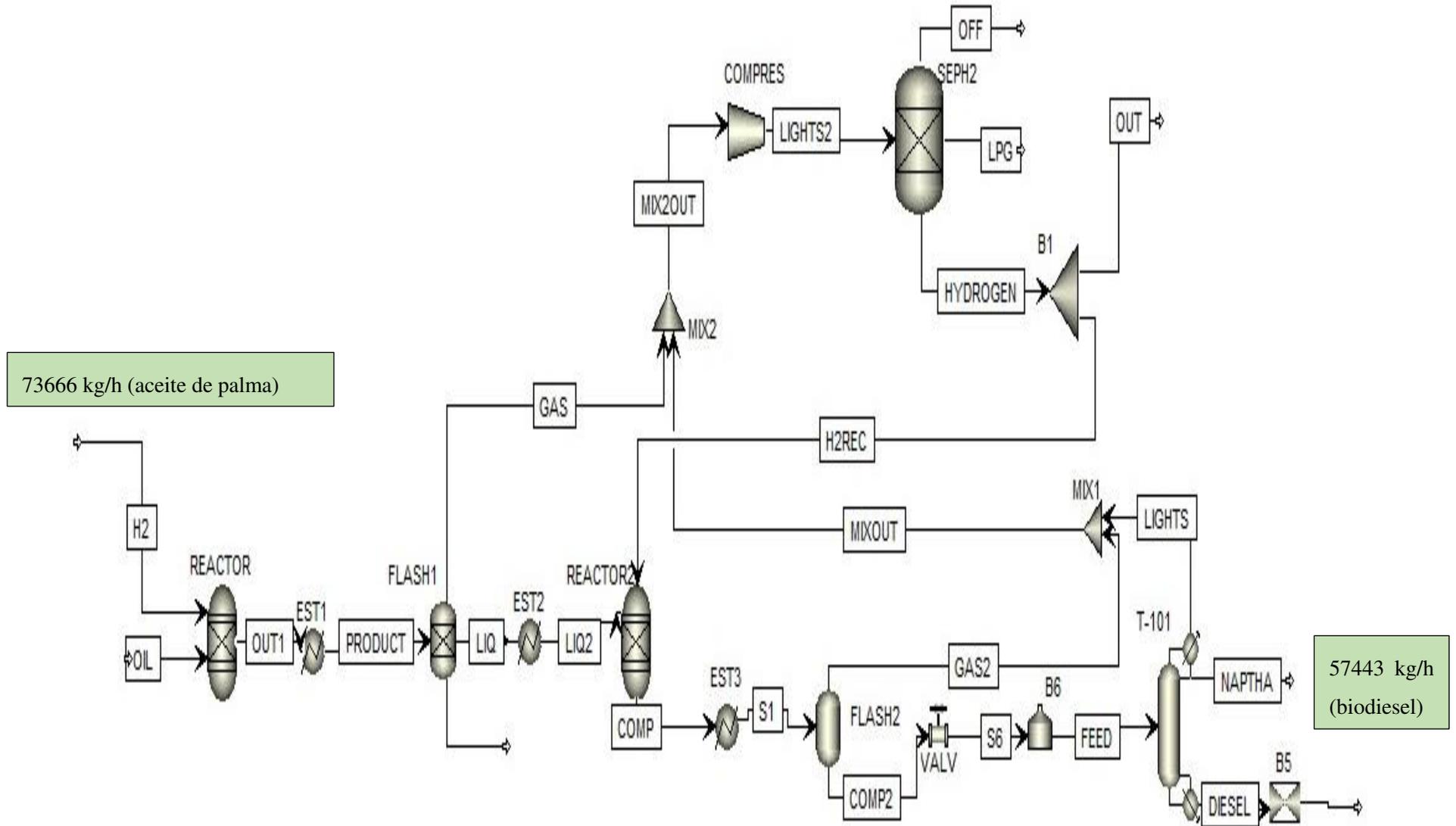
Figura 4.7. Composición de que es productos finales a la salida de la torre de destilación.

	Units	FEED	DIESEL	LIGHTS	NAPHTHA
H2	kg/hr	0.580944	4.93341e-31	0.578112	0.00283162
C16H34	kg/hr	123.201	123.134	2.05687e-09	0.0671764
C18H38	kg/hr	76.5792	76.5791	4.3774e-13	0.000117888
C15H32	kg/hr	115.57	114.534	1.06152e-07	1.03546
C17H36	kg/hr	180.896	180.892	4.88625e-11	0.00465006
C3H8	kg/hr	0	0	0	0
CO2	kg/hr	0	0	0	0
H2O	kg/hr	0	0	0	0
IC15	kg/hr	10401.3	10308.1	9.55368e-06	93.1914
IC16	kg/hr	11088.1	11082	1.85119e-07	6.04588
IC17	kg/hr	16280.7	16280.2	4.39763e-09	0.418505
IC18	kg/hr	18379	18379	1.05058e-10	0.028293
C4H10	kg/hr	218.775	2.25545e-22	7.28056	211.494
C5H12	kg/hr	284.018	6.77459e-18	2.37013	281.648
C6H14	kg/hr	343.566	8.07077e-14	0.94985	342.616
C7H16	kg/hr	401.004	4.96172e-10	0.317112	400.687
C8H18	kg/hr	569.487	1.72269e-06	0.161684	569.325
C9H20	kg/hr	571.953	0.00171814	0.0500208	571.902
C10H22	kg/hr	570.367	1.56015	0.0154336	568.791
C11H24	kg/hr	626.62	221.831	0.00340859	404.786
C12H26	kg/hr	474.342	322.202	0.00041321	152.139

Fuente: Simulación con Aspen Plus V11, 2023

La Figura 4.8. muestra el proceso. Ingresar el aceite de palma pretratado como indica el punto 4.1.1.2. se incluye la unidad de aminas para la regeneración de hidrógeno.

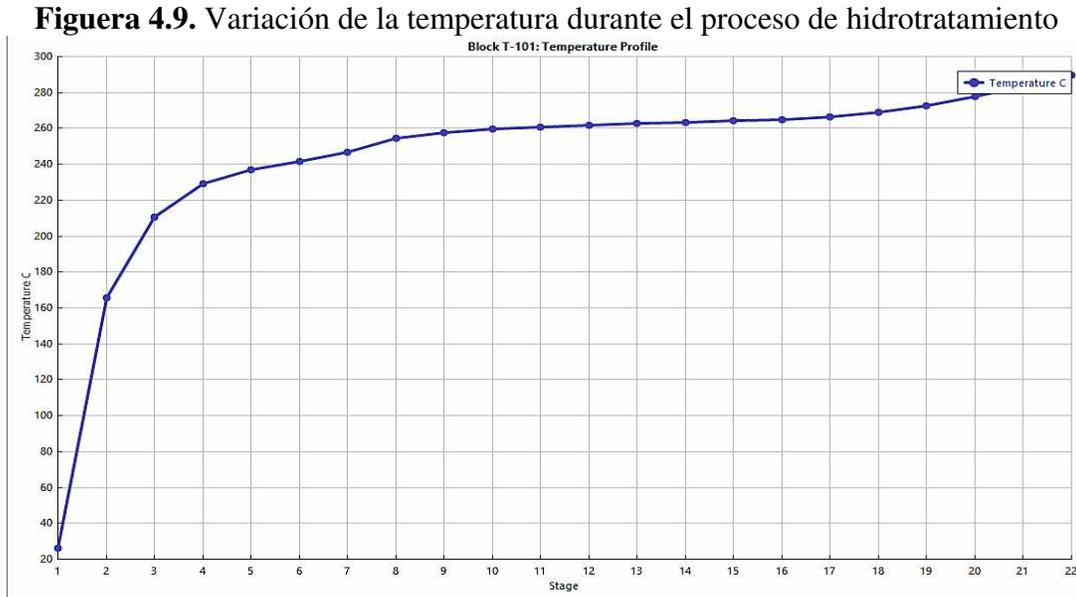
Figura 4.8. Proceso completo para la obtención de diésel verde.



Fuente: Simulación con Aspen Plus V11, 2023

4.1.2.3. Parámetros Obtenidos

El proceso de hidrotratamiento simulado se desarrolla en 22 etapas. En la figura 4.9. se observa el incremento de la temperatura durante el proceso va desde los 25 hasta los 290°C.



Fuente: Simulación con Aspen Plus v11, 2023

Se puede verificar el rendimiento del proceso de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{aceite} = 73666 \frac{Kg}{h} \quad y \quad \dot{m}_{green Diesel} = 57443.7 \frac{Kg}{h}$$

$$n = \frac{57443.7}{73666} * 100\% \quad \dots \quad n = 78\%$$

Para concluir, el rendimiento en la producción de diésel es del 80 %, el restante 15% representan a la nafta verde y finalmente el 5% es el do decano.

4.2. IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE RIESGOS EN EL PROCESO DE HIDRO-TRATAMIENTO DE ACEITES VEGETALES

En el presente estudio se usaron dos tipos de estudios para realizar los análisis de riesgos en cada área operativa de la planta HVO. Primero, mediante el método cualitativo de Análisis Funcional de Operabilidad HAZOP, se hizo la selección de cuatro nodos para analizar las variaciones de presión, temperatura y caudal de alimentación. Segundo, mediante métodos cuantitativos se construyó matrices de riesgo siguiendo la norma GTC 45.

4.2.1. Análisis cualitativo de riesgos mediante HAZOP

La selección de los nodos de estudio se ha realizado considerando un hipotético caso en el que toda la instalación está involucrada en la operación. Para los restantes modos de operación se tendrán en cuenta los nodos según las instalaciones involucradas en cada caso.

La selección de nodos es la siguiente:

Nodo 1: Suministro de gas natural (reformado con vapor de agua).

Nodo 2: Reactor hidrotreatmento y separador.

Nodo 3: Reactor isomerización y horno.

Nodo 4: Suministro de hidrogeno.

4.2.1.1. Aplicación del método al Nodo 1: Suministro de gas natural

Según el autor Batista et. al (2005) en la actualidad, casi el 95% del hidrógeno que se produce, es a partir de los hidrocarburos. Debido a que la planta HVO será instalada en la refinería GEB el hidrogeno será obtenido de una de las corrientes de la refinería y a continuación se propone el proceso para su obtención.

- Reformado con vapor de agua (steam reforming): Con este proceso el hidrógeno se obtiene a partir del gas natural y si éste contiene azufre se tiene que hacer una desulfuración. El principal componente del gas natural es metano CH_4 y la reacción consiste básicamente en separar el carbono del hidrógeno. Hay dos reformadores: el primario y el secundario.

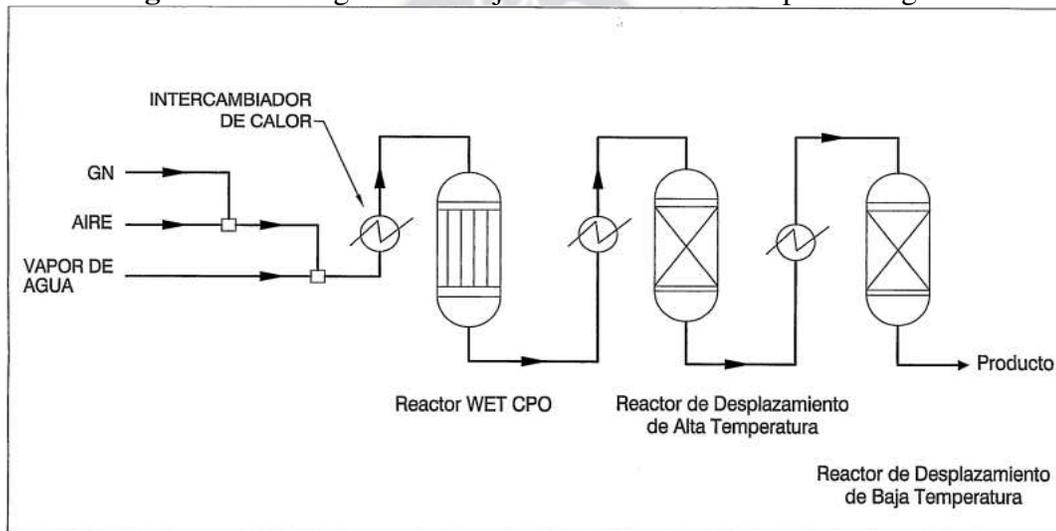
En el reformador primario, los gases de HC purificados + vapor de H_2O desionizada son combinados en una relación H_2O : C de 2,5 a 4; correspondiendo a una concentración de entrada alrededor de 20-25% CH_4 (para una alimentación de gas natural). La mezcla es precalentada alrededor de 400 °C a una presión de 20 - 30 atm e introducida en los tubos del reactor conteniendo catalizador Ni/MgO o Ni/CaO a alrededor de 800 °C. Alrededor del 50% de la alimentación de CH_4 es convertida en un reactor reformador primario. El gas natural se convierte en hidrógeno y monóxido de carbono como sigue continuación: $CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$.

Después el reformador secundario, el gas de salida del reformador de vapor primario contiene alrededor de 10-13% de CH_4 que no ha reaccionado, el cual puede ser reformado más aún en un segundo reactor teniendo una temperatura de entrada de alrededor de 800 °C y una temperatura de salida de 900-1000 °C, lo cual decrece el contenido de CH_4 a menos de 1% y se obtiene una concentración de

salida de CO de 10-13%. A continuación del reformador secundario tiene lugar la reacción de intercambio (Water Gas Shift) como sigue a continuación: $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$.

La reacción de Water Gas Shift se hace en dos etapas, una a alta y otra a baja temperatura. La etapa de alta temperatura tiene lugar a 400 °C y la de baja temperatura tiene lugar a 200 °C. Posteriormente, se hace una purificación mediante el proceso PSA (pressure swing adsorption) y se obtiene un 99.9% de H_2 . El proceso tiene una eficiencia entre el 70 y el 90%. La instalación sobre la cual está realizado este análisis de operabilidad fue propuesto por el autor Cambra (2006), y consta de 3 reactores y 3 intercambiadores de calor tal como se muestra en la figura 4.10.

Figura 4.10. Diagrama de flujo del reformado de vapor con agua.



Fuente: Cambra, 2006.

Para aplicar las desviaciones de las variables de proceso se tiene en cuenta que el Nodo 1 abarca desde los puntos de suministro de cada gas natural, intercambiadores y reactores. En el caso del Nodo 1, debido a la presencia del caudalímetro cabe tener en cuenta, además de la presión del nodo, el caudal suministrado. Por tanto, se tendrá en cuenta el caudal suministrado en la desviación de la variable de operación "presión".

NODO 1: Suministro de gas natural

VARIABLE: PRESIÓN/CAUDAL DE SUMINISTRO

PALABRA CLAVE: NO

DESVIACIÓN: Presión/caudal nulo de suministro al resto de la instalación

En este caso se tiene como referencia presión (y caudal) nulo tras las válvulas de retención. Se analizará las causas posibles para una línea de suministro genérica y sus consecuencias.

CAUSAS POSIBLES

- Fugas en uniones de instrumentos y tuberías
- Fallo en la válvula del manorreductor, debido a mal cierre o desgaste por uso.
- Fallo del indicador de presión aguas arriba del manorreductor. Indica presión mayor a la real,
- Fallo por error del operario al no reducir la presión de la línea 20 bar por encima de la presión de operación.
- Fallo en el caudalímetro: de programación, presión a la entrada menor a 5 bar; fallo en sensor, termorresistencias, fallo en la válvula interna.
- Saturación del filtro antipartículas situado tras el caudalímetro.
- Fallo en la válvula antirretorno debido a desgaste por uso.

CONSECUENCIAS POSIBLES

La instalación esta provista de detectores adecuados. No existe consecuencias debido a fugas. La falta o defecto de suministro de gas natural haría inviable el análisis de la corriente de proceso mediante cromatografía. Supondría pérdidas económicas.

CONSECUENCIAS EN EL CASO DE LÍNEA DE SUMINISTRO DE GAS NATURAL

No supone fallo de operación ni de seguridad el hecho de no suministrar gas natural. No supone fallo para el precalentador, los reactores ni para el sistema de control de presión de la instalación. Sin embargo, no se completaría las reacciones del reformado de vapor.

MEDIDAS CORRECTIVAS

Medida correctiva 1

Implantar un registro de datos sobre las revisiones de mantenimiento realizadas por el personal del laboratorio indicando fecha, actividades realizadas, operador, anomalías detectadas, ..., siendo este revisado por el responsable de laboratorio. Se ha de realizar comprobaciones establecidas en el tiempo según el uso de la instalación, renovar los dispositivos con periodicidad y ante fallo.

Es de importancia destacar la revisión y mantenimiento de la válvula y manómetros del manorreductor, así como de los filtros antipartículas y de las válvulas antirretorno.

Medida correctiva 6

Programar los caudalímetros de forma que el set point mínimo posible de programación sea el caudal mínimo admisible (8 Nml/min). De esta manera se eliminarían los fallos de programación a caudales inferiores al límite inferior del rango del caudalímetro.

NODO 1: Suministro de gas natural
VARIABLE: PRESIÓN/CAUDAL DE SUMINISTRO
PALABRA CLAVE: MENOS
DESVIACIÓN: Presión/caudal real suministrada menor a la deseada

En este caso se tiene como referencia presión (y caudal) real menor al requerido tras las válvulas de retención. Se analizará las causas posibles para una línea de suministro genérica y posteriormente las consecuencias para cada línea en particular.

CAUSAS POSIBLES

Las mismas que en el anterior análisis.

CONSECUENCIAS EN EL CASO DE FUGAS EN LAS LÍNEAS DE SUMINISTRO

En el caso de estudio, la instalación se encuentra en un recinto confinado. Se dispone de detectores con aviso acústico en caso de concentraciones de peligro, así como del adecuado sistema de ventilación. Los operarios disponen de la formación adecuada para actuar en casos de fuga de los distintos gases

CONSECUENCIAS EN LOS CAUDALÍMETRO

Si la presión deseada es la mínima posible de operación, puede suceder que la presión suministrada no sea suficiente como para superar la pérdida de carga de la instalación, con lo que no se suministraría gas al proceso. Si la presión anterior al caudalímetro no supera la pérdida de carga en el mismo, no se suministrará caudal y por tanto la presión a la que se suministra al proceso es nula. Las consecuencias son análogas a las mostradas en la palabra guía anterior "NO" para la variable presión.

Si esta situación se produce durante la purga de la instalación con nitrógeno, puede provocar contaminación en la siguiente operación, reacciones indeseadas en los equipos, presurización de zonas de la instalación mientras no está en funcionamiento.

Si el filtro se satura gradualmente, la presión tras el caudalímetro irá aumentando. Si dicha presión iguala a la anterior al caudalímetro, la presión de suministro será nula, tal y como está indicado en la

desviación anterior para la palabra guía "NO". Si dicha presión alcanzase los 100 bar, se dañarían los caudalímetros.

CONSECUENCIAS EN EL CASO DE LÍNEA DE SUMINISTRO DE GAS NATURAL

Durante la operación de la instalación, presiones de suministro al proceso menores a las deseadas de gas natural no supone fallo de operación. Es decir, no se produce daño en los reactores ni en el sistema de control de presión de la instalación. El único problema es que la reacción quedaría incompleta. Supondría pérdidas económicas de operación.

CONSECUENCIAS EN EL LAZO DE CONTROL DE PRESIÓN

No existe ningún efecto derivado de una menor alimentación de cualquier reactivo. Ante una desviación, el lazo de control de presión tendrá en cuenta la diferencia de presión entre la entrada y salida de los reactores, sin distinguir entre compuestos químicos.

CONSECUENCIAS EN EL SALIDA DE PURGA

No se tienen peligros derivados del uso del sistema de purga de la central de gases debido a que la salida de la misma está localizada a una altura adecuada que permite la correcta dispersión de los gases en la atmósfera de forma segura.

MEDIDAS CORRECTIVAS

Medida correctiva 7

Instalar una alarma por baja presión aguas arriba del caudalímetro. El valor mínimo al cual se activa dicha alarma es de 5 bar (pérdida de carga en el caudalímetro). En el caso de que esta presión se alcanzase, el caudalímetro dejaría de suministrar caudal y la presión en la línea sería nula. La instalación estaría protegida por el lazo de control indicado en la medida 4. De esta manera se alerta al operador de forma rápida que el fallo que se ha producido en la instalación se debe a baja presión en la línea.

NODO 1: Suministro de gas natural
VARIABLE: PRESIÓN/CAUDAL DE SUMINISTRO
PALABRA CLAVE: MAS
DESVIACIÓN: Presión/caudal real suministrada mayor a la deseada

En este caso se tiene como referencia presión (y caudal) real mayor al requerido tras las válvulas de retención. Se analizará las causas posibles para una línea de suministro genérica y posteriormente las consecuencias para cada línea en particular.

CAUSAS POSIBLES

- Fallo en la válvula del manorreductor por apertura parcial por error o debido a mal cierre causado por desgaste de uso.
- Fallo del indicador de presión aguas arriba del manorreductor. Indica presión menor a la real.
- Fallo del operario. Reducción de presión mayor a 20 bar sobre la presión de operación.
- Fallo en el CAUDALÍMETRO: de programación, fallo en sensor, termorresistencias, fallo en válvula interna.

CONSECUENCIAS EN LOS CAUDALÍMETROS

En el caso de que la presión de operación sea la máxima posible, si la presión real disponible aguas arriba del caudalímetro es superior a 100 bar, o si la diferencia de presión en el mismo es mayor a 20 bar, éste se vería dañado e inutilizado debido a que está por encima del valor máximo admisible por dicho instrumento. Puede provocar fugas a través de los sellos internos del mismo. Las consecuencias derivadas de las fugas de cada gas han sido analizadas anteriormente en el Nodo 2 en la palabra clave "NO".

CONSECUENCIAS EN LAS LÍNEAS DE SUMINISTRO Y PURGA

En los casos en los que la presión real de suministro de cualquier gas sea mayor a la deseada debido a fallos no eliminados por la acción de los caudalímetros, implica lo siguiente:

Reacciona la máxima cantidad posible del reactivo que intervenga en la misma reacción, obteniéndose el máximo posible de productos.

El exceso de reactivo supondrá mayores presiones parciales del mismo en los reactores 1,2 y 3. La presión total en los reactores no supone fallo de operación ni de seguridad al estar controlada por el lazo de control de presión.

La salida de purga de la instalación estará compuesta por una mayor concentración de gas alimentado en exceso al proceso. No supone peligro debido a que la salida de la misma está localizada a una altura adecuada que permite la correcta dispersión de los gases en la atmósfera de forma segura.

MEDIDAS CORRECTIVAS

Medida correctiva 8

Instalar una alarma de alta presión justo a l-a entrada al precalentador, la cual paralice el funcionamiento de la planta. Para ello el valor de referencia de la misma ha de ser 95 bar, presión máxima admisible por la instalación.

4.2.1.2. Aplicación del método al Nodo 2: reactor hidrotratamiento y separador

La instalación dispone de dos reactores de lecho de goteo, que según el modo de operación de la planta pueden utilizarse por separado o en serie. Para este análisis de operabilidad se estudiarán por separado.

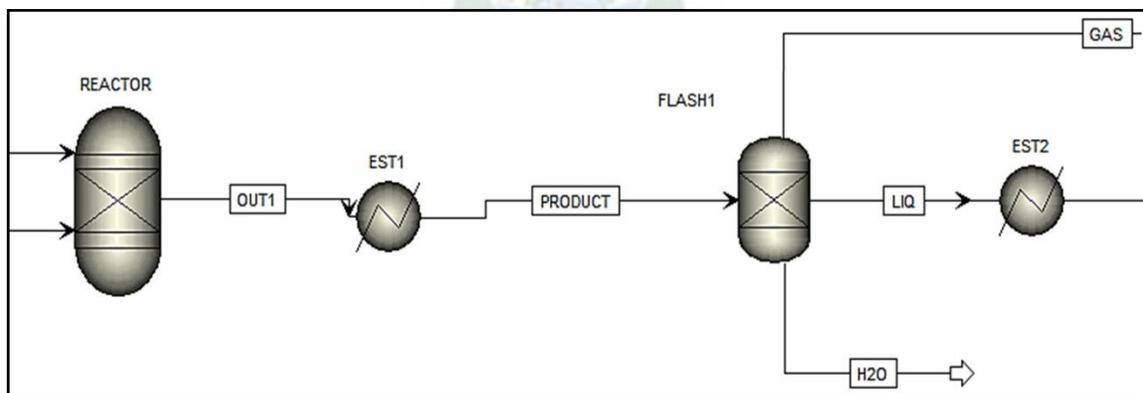
Para aplicar las desviaciones de las variables de proceso se tiene en cuenta que el Nodo 1 abarca desde la válvula de entrada al reactor V_1 hasta la válvula V_2 de la línea de salida del mismo. Las líneas de entrada y salida del reactor están comunicadas por un juego de válvulas de aguja manuales, las cuales permiten los diferentes modos de operación. En este nodo se analizaron 2 variables de proceso: presión o caudal, y temperatura.

Se establece alarma por alta temperatura mediante caña pirométrica de seguridad de tipo axial situada en la superficie del reactor, con temperatura máxima de uso de $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura a la cual se paraliza toda la planta. La temperatura de operación en este nodo es de $360\text{ }^{\circ}\text{C}$, siendo la presión de operación de 60 bar.

En la figura 4.11. se presenta el diagrama de flujo del área operativa de hidrotratamiento. La instalación dispone de un reactor de lecho de goteo denominado “REACTOR”, un estabilizador primario denominado “EST1”, un separador trifásico denominado “FLASH 1” hasta un estabilizador secundario denominado “EST2”.

El separador trifásico, tiene como función eliminar los contaminantes producidos en la primera reacción como ser gases de CO_2 , CO acompañado de cantidades de H_2 que no reaccionó. Además de evacuar a los primeros hidrocarburos livianos producidos. Y por la parte inferior del separador se debe separar el agua producida.

Figura 4.11. Diagrama de flujo del área operativa de hidrotratamiento.



Fuente: Simulación con Aspen Plus v11, 2023

NODO 2: REACTOR HIDROTRATAMIENTO Y SEPARADOR
VARIABLE: PRESIÓN/CAUDAL
PALABRA CLAVE: NO
DESVIACIÓN: Caudal nulo

En este caso se tiene como referencia que el caudal es nulo tras la válvula V_1 de la línea de entrada reactor.

A. CAUSAS POSIBLES

Cierre de la válvula de entrada V_1 o de la válvula de salida V_2 , debido al desgaste o error del operario.

B. CONSECUENCIAS POSIBLES

En el caso en el que la válvula de entrada al reactor de hidrotreatmento (V_1) se cierre, la presión en el reactor irá disminuyendo. Al mismo tiempo, la presión aguas arriba al reactor irá aumentando progresivamente lo que provocará que el lazo de control de presión indique a la válvula de control (V_3) su apertura hasta que la presión alcance el valor del set point. Pero esto no será posible debido a que no hay salida de reactivos al permanecer V_1 cerrada. Es en este momento en el cual se debe de actuar paralizando la planta, pues de continuarse en el tiempo se producirá sobrepresión en la línea de alimentación a la torre destiladora. Supondría sobrepresión dando lugar a daños en los sellos de unión de tuberías, instrumentos y equipos, lo que puede dar lugar a fugas. Además, de no detener este fallo, podría darse lugar la despresurización de los dos reactores.

En el caso en el que algunas de las válvulas de salida del reactor V_2 o V_3 se cierre, la presión en el reactor y en la línea de entrada al mismo irá aumentando progresivamente. El lazo de control de presión actuaría de la misma forma que el caso anterior de cierre de V_1 , ocasionándose consecuencias análogas que afectarían también al reactor.

Como caso extremo de fugas, podría provocarse la despresurización de la instalación.

C. MEDIDAS CORRECTIVAS

Medida correctiva 1

Ver nodo 1.

Medida correctiva 2

Instalación de una alarma de baja presión tras la válvula V_2 de salida del reactor R1. El valor de referencia en el cual se activa dicha alarma se establecería teniendo en cuenta diferencia entre

la presión de operación y la máxima pérdida de carga a través del reactor. Presiones inferiores al valor correspondiente indicaría una acumulación en alguna zona anterior de la instalación.

NODO 2: REACTOR HIDROTRATAMIENTO Y SEPARADOR
VARIABLE: PRESIÓN
PALABRA CLAVE: MENOS
DESVIACIÓN: Presión menor de la requerida

En este caso se tiene como referencia que la presión tras la válvula de entrada V_1 del reactor es menor a la requerida.

A. CAUSAS POSIBLES

- Cierre parcial de la válvula de entrada V_1 debido al desgaste o error del operario.
- Fugas en las tuberías, instrumentos y equipos que forman parte del presente nodo.

B. CONSECUENCIAS POSIBLES

En el caso en el que la válvula de entrada al reactor 1 (V_1) se cierre parcialmente, la presión en el reactor irá disminuyendo. Al mismo tiempo, la presión aguas arriba al reactor irá aumentando progresivamente; lo que provocará que el lazo de control de presión indique a la válvula de control (V_3) su apertura hasta que la presión alcance el valor del set point. Por tanto, el lazo de control de presión corrige esta desviación.

En el caso en el que algunas de las válvulas de salida del reactor V_4 se cierre parcialmente, la presión en el reactor y en la línea de entrada al mismo irá aumentando progresivamente. El lazo de control de presión actuaría de forma análoga al caso anterior, por lo que se corregiría automáticamente esta desviación.

C. MEDIDAS CORRECTIVAS

Esta desviación se ve corregida debido a la acción correctora del lazo de control de presión (V_3 y V_4); por tanto, no es necesaria ninguna medida correctora de la instalación.

NODO 2: REACTOR HIDROTRATAMIENTO Y SEPARADOR
VARIABLE: PRESIÓN
PALABRA CLAVE: MÁS
DESVIACIÓN: Mayor presión de la requerida

En este caso se tiene como referencia que la presión tras la válvula de entrada V_1 del reactor es mayor a la requerida.

No existen fallos propios al nodo de estudio que provoquen esta desviación. En el hipotético caso de que se diese lugar, esta desviación no conlleva consecuencia alguna debido a la acción correctora del lazo de control de presión (V_3 y V_4); por tanto, no es necesaria ninguna medida correctora de la instalación. Si cabe tener en cuenta el correcto mantenimiento de la instalación (Medida Correctora 1), para garantizar el correcto funcionamiento de la misma.

NODO 2: REACTOR HIDROTRATAMIENTO Y SEPARADOR
VARIABLE: TEMPERATURA
PALABRA CLAVE: MENOS
DESVIACIÓN: Menor temperatura de la requerida

En este caso se tiene como referencia que la temperatura en el reactor de hidrotratamiento es menor a la requerida, en el punto de medida del termopar del lazo de control instalado.

A. CAUSAS POSIBLES

- Fallo de la resistencia eléctrica del equipo de calentamiento en el pretratamiento, la cual no suministra suficiente temperatura como para que el lazo de control la regule, o en el caso de que la temperatura máxima que alcance sea menor a la deseada. Debido al desgaste por uso, sobrecalentamiento o picos de tensión en la corriente eléctrica.
- Fallo en el termopar, el cual indique al controlador mayor temperatura de la real.
- Fallo del operario de programación del controlador de temperatura.

B. CONSECUENCIAS POSIBLES

Las condiciones de temperatura de operación real no serían las adecuadas para la correcta reacción de los reactivos. Este hecho conlleva a menores eficiencias de reacción, por lo que se tendrían mayores presiones parciales de reactivos sin reaccionar al final del proceso; lo que supone pérdidas económicas y mayor presencia de inflamables en la línea de salida del proceso.

C. MEDIDAS CORRECTIVAS

Medida correctiva 1

Ver nodo 1.

Medida correctiva 3

Instalación de una alarma por baja temperatura en la línea de salida del reactor. El valor de referencia de dicha alarma será 359 °C, ligeramente inferior a la mínima posible de operación; con el fin de permitir y asegurar la adecuada reacción cuando la temperatura de reacción sea 360 °C.

NODO 2: REACTOR HIDROTRATAMIENTO Y SEPARADOR
VARIABLE: TEMPERATURA
PALABRA CLAVE: MÁS
DESVIACIÓN: Mayor temperatura de la requerida

En este caso se tiene como referencia que la temperatura en el reactor 1 es mayor a la requerida, en el punto de medida del termopar TT5 del lazo de control instalado.

A. CAUSAS POSIBLES

- Fallo de la resistencia eléctrica del equipo de calentamiento en el pretratamiento, la cual no suministra suficiente temperatura como para que el lazo de control la regule, o en el caso de que la temperatura máxima que alcance sea menor a la deseada. Debido al desgaste por uso, sobrecalentamiento o picos de tensión en la corriente eléctrica.
- Fallo en el termopar, el cual indique al controlador mayor temperatura de la real.
- Fallo del operario de programación del controlador de temperatura.

B. CONSECUENCIAS Y MEDIDAS CORRECTIVAS POSIBLES

No existen fallos de operación relacionados con el exceso de temperatura. Únicamente supondría mayores gastos energéticos por parte de la resistencia eléctrica. Debido a la existencia de una alarma por alta temperatura con valor de referencia 900°C, no es necesaria ninguna medida correctora adicional en la instalación. Si cabe tener en cuenta el correcto mantenimiento de la instalación (medida correctiva 1), para garantizar el correcto funcionamiento de la misma.

4.2.1.3. Aplicación del método al Nodo 3: reactor isomerización y horno

Para aplicar las desviaciones de las variables de proceso se tiene en cuenta que el Nodo 2 abarca desde la válvula de entrada al reactor hasta del horno sobre la misma línea de flujo.

Dado que el proceso requiere realizarse a temperatura se emplea un horno. El aporte de calor en el horno se realiza mediante resistencia, con temperatura máxima de 600°C, de material refractario para minimizar pérdidas al exterior y riesgo por quemaduras.

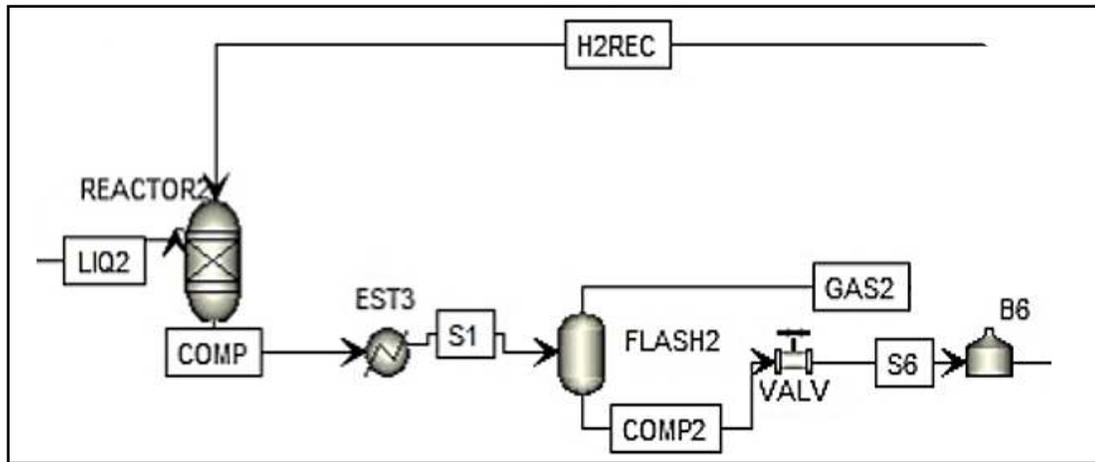
El control de la temperatura se realiza mediante un termopar (controlador de temperatura). El controlador regula el aporte de calor necesario que debe suministrar el horno. La temperatura de operación en este nodo es de 360°C, siendo la presión de operación de 40 bar.

En la figura 4.12. se presenta el diagrama de flujo del área operativa de isomerización y cracking. La instalación dispone de un reactor de lecho de goteo denominado “REACTOR 2”, un estabilizador

denominado “EST3”, un separador bifásico denominado “FLASH 2”, válvula para reducir la presión del flujo hasta llegar a un horno.

El software Aspen plus calculo los parámetros de presión y temperatura del separador bifásico sus presión y temperatura de trabajo son: 15 *bares* y 30°C y respectivamente. La función del horno es calentar el flujo antes de que ingrese a la torre de destilación, según bibliografía esta temperatura no debe exceder los 300 °C para evitar el coque de la alimentación.

Figura 4.12. Diagrama de flujo del área operativa de isomerización



Fuente: Simulación con Aspen Plus v11, 2023

NODO 3: REACTOR ISOMERIZACIÓN Y HORNO
VARIABLE: PRESIÓN/CAUDAL
PALABRA CLAVE: NO
DESVIACIÓN: Caudal nulo

En este caso se tiene como referencia que el caudal es nulo tras el estabilizador (EST3) de la línea de salida reactor.

Se tratarán términos de caudal debido a que, debido a la presencia del lazo de control de presión, la presión no puede ser nula en esta zona de la instalación. Ya que el flujo debe continuar hasta la última etapa del proceso.

A. CAUSAS POSIBLES

- Cierre de la válvula de entrada V_2 o de salida V_3 , desgaste o error del operario.

B. CONSECUENCIAS POSIBLES

En el caso en el que la válvula de entrada al reactor de hidrotratamiento se cierre, la presión en el reactor irá disminuyendo. Al mismo tiempo, la presión aguas arriba al reactor irá aumentando progresivamente lo que provocará que el lazo de control de presión indique a la válvula de control (V_3) su apertura hasta que la presión alcance el valor del set point. Pero esto no será posible debido a que no hay salida de reactivos al permanecer V_4 cerrada. Es en este momento en el cual se debe de actuar paralizando la planta, pues de continuarse en el tiempo se producirá sobrepresión en las líneas aguas arriba del reactor de isomerización, sobre el reactor de hidrotratamiento. Supondría daños en los sellos de unión de tuberías, instrumentos y equipos, lo que puede dar lugar a fugas. Además, de no detener este fallo, podría darse lugar la despresurización del reactor de isomerización.

En el caso en el que la válvula de salida del reactor V_4 se cierre, la presión en el reactor y en la línea de entrada al mismo irá aumentando progresivamente. El lazo de control de presión actuaría de la misma forma que el caso anterior de cierre de V_3 , ocasionándose consecuencias análogas.

C. MEDIDAS CORRECTIVAS

Medida correctiva 1

Ver nodo 1.

Medida correctiva 4

Se trata de modificar la instalación de la alarma de baja presión tras la válvula V_2 de salida del reactor R2, en lugar de a la salida del reactor R1. El valor de referencia en el cual se activa dicha alarma se establecería teniendo en cuenta diferencia entre la presión de operación y la máxima pérdida de carga a través del reactor. Presiones inferiores al valor correspondiente indicaría una acumulación en alguna zona anterior de la instalación.

NODO 3: REACTOR ISOMERIZACIÓN Y HORNO
VARIABLE: PRESIÓN
PALABRA CLAVE: MENOS
DESVIACIÓN: Presión menor de la requerida

En este caso se tiene como referencia que la presión tras la válvula de salida V_2 del reactor es menor a la requerida.

A. CAUSAS POSIBLES

- Cierre parcial de la válvula de entrada V_2 o de la válvula de salida V_4 debido al desgaste o error del operario.

- Fugas en las tuberías, instrumentos y equipos que forman parte del presente nodo.

B. CONSECUENCIAS POSIBLES: En el caso en el que la válvula de entrada al reactor isomerización (V_2) se cierre parcialmente, la presión en el reactor irá disminuyendo. Al mismo tiempo, la presión aguas arriba al reactor irá aumentando progresivamente; lo que provocará que el lazo de control de presión indique a la válvula de control (V_3) su apertura hasta que la presión alcance el valor del set point. Por tanto, el lazo de control de presión corrige esta desviación.

En el caso en el que la válvula de salida del reactor V_4 se cierre parcialmente, la presión en el reactor y en la línea de entrada al mismo irá aumentando progresivamente. El lazo de control de presión actuaría de forma análoga al caso anterior, por lo que se corregiría automáticamente esta desviación.

C. MEDIDAS CORRECTIVAS

Esta desviación se ve corregida debido a la acción correctora del lazo de control de presión (V_3 y V_4) por tanto, no es necesaria ninguna medida correctora de la instalación. Si cabe tener en cuenta el correcto mantenimiento de la instalación (Medida Correctora 1), para garantizar el correcto funcionamiento de la misma.

NODO 3: REACTOR ISOMERIZACIÓN Y HORNO
VARIABLE: PRESIÓN
PALABRA CLAVE: MÁS
DESVIACIÓN: Mayor presión de la requerida

En este caso se tiene como referencia que la presión tras la válvula de salida V_2 del precalentador es mayor a la requerida.

No existen fallos propios al nodo de estudio que provoquen esta desviación. En el hipotético caso de que se diese lugar, esta desviación no conlleva consecuencia alguna debido a la acción correctora del lazo de control de presión (V_3 y V_4); por tanto, no es necesaria ninguna medida correctora de la instalación.

NODO 3: REACTOR ISOMERIZACIÓN Y HORNO
VARIABLE: TEMPERATURA
PALABRA CLAVE: MENOS
DESVIACIÓN: Menor temperatura de la requerida

En este caso se tiene como referencia que la temperatura en el reactor 2 es menor a la requerida, en el punto de medida del termopar 2 del lazo de control instalado.

A. CAUSAS POSIBLES

- Fallo de la resistencia eléctrica del horno, la cual no suministra suficiente temperatura como para que el lazo de control la regule, o en el caso de que la temperatura máxima que alcance sea menor a la deseada. Debido al desgaste por uso, sobrecalentamiento o picos de tensión en la corriente eléctrica.
- Fallo en el termopar 2, el cual indique al controlador mayor temperatura de la real.
- Fallo del operario de programación del controlador de temperatura.

B. CONSECUENCIAS POSIBLES

Las condiciones de temperatura de operación real no serían las adecuadas para la correcta reacción de los reactivos. Este hecho conlleva a menores eficiencias de reacción, por lo que se tendrían mayores presiones parciales de reactivos sin reaccionar al final del proceso; lo que supone pérdidas económicas y mayor presencia de inflamables en dicha línea.

C. MEDIDAS CORRECTIVAS

Medida correctiva 1

Ver nodo 1.

Medida correctiva 5

Instalación de una alarma por baja temperatura en la línea de salida del reactor R2. El valor de referencia de dicha alarma será 359°C, ligeramente inferior a la de operación; con el fin de permitir y asegurar la adecuada reacción cuando la temperatura de reacción sea 360°C.

NODO 3: REACTOR ISOMERIZACIÓN Y HORNO

VARIABLE: TEMPERATURA

PALABRA CLAVE: MÁS

DESVIACIÓN: Mayor temperatura de la requerida

En este caso se tiene como referencia que la temperatura en el reactor 2 es mayor a la requerida, en el punto de medida del termopar 2 del lazo de control instalado.

A. CAUSAS POSIBLES

- Fallo del controlador cuando la resistencia eléctrica del horno 2, suministra excesiva temperatura. Debido al desgaste por uso, sobrecalentamiento o picos de tensión en la corriente eléctrica.
- Fallo en el termopar 2, el cual indique el controlador menor temperatura de la real.

- Fallo del operario de programación del controlador de temperatura.

B. CONSECUENCIAS Y MEDIDAS CORRECTORAS POSIBLES

No existen fallos de operación relacionados con el exceso de temperatura. Únicamente supondría mayores gastos energéticos por parte de la resistencia eléctrica. Debido a la existencia de una alarma por alta temperatura con valor de referencia 900°C, no es necesaria ninguna medida correctora adicional en la instalación. Si cabe tener en cuenta el correcto mantenimiento de la instalación (Medida Correctora 2), para garantizar el correcto funcionamiento de la misma.

4.2.1.4. Aplicación del método al Nodo 4: suministro de hidrogeno

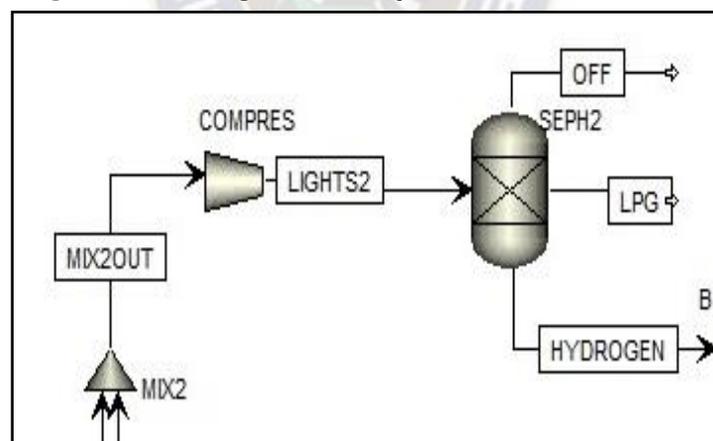
Para aplicar las desviaciones de las variables de proceso se tiene en cuenta que el Nodo 3 abarca desde el almacén del hidrogeno comprimido hasta las líneas de flujo que alimentan a los reactores.

La temperatura del hidrogeno es de 50°C, siendo la presión de operación de 20 bar.

La figura 4.13 muestra los equipos que conforman esta instalación principalmente tenemos un compresor y un separador.

Que tiene como función recuperar hidrogeno para continuar el proceso de obtención de biodiesel y consiste en un compresor y un separador bifásico.

Figura 4.13. Diagrama de flujo de la unidad de aminas



Fuente: Simulación con Aspen Plus v11, 2023

NODO 4: SUMINISTRO DE HIDROGENO

VARIABLE: PRESIÓN/CAUDAL DE SUMINISTRO

PALABRA CLAVE: NO

DESVIACIÓN: Presión/caudal nulo de suministro al resto de la instalación

En este caso se tiene como referencia presión (y caudal) nulo tras las válvulas de retención. Se analizará las causas posibles para una línea de suministro genérica y posteriormente las consecuencias para

cada línea en particular.

En este caso se tiene como referencia presión (y caudal) nulo tras las válvulas de retención. Se analizará las causas posibles para una línea de suministro genérica y posteriormente las consecuencias para cada línea en particular.

A. CAUSAS POSIBLES ()**

- Fuga de gas a través de las juntas de los instrumentos que forman parte de la línea.
- Fallo en la válvula del manorreductor, debido a los siguientes motivos:
 - Cierre por error, debido a fallo del operario.
 - Debido al desgaste por uso. Puede ocurrir que durante la operación la válvula se cierre debido a fallo mecánico por desgaste.
- Fallo del indicador de presión situado tras la válvula del manorreductor. Indica más presión de la real, si se está operando a baja presión puede indicar presión cuando realmente es nula.
- Fallo por error del operario al no reducir la presión de la línea 20 bar por encima de la presión de operación.
- Fallo en el caudalímetro, debido a los siguientes motivos:
 - Fallo de programación, debido error del operario. Los caudalímetros están diseñados para suministrar caudal de gas en un rango de [8, 25000] Nml/min. Si se programa a un caudal menor al límite inferior del rango, el caudalímetro no suministrará gas y por tanto la presión tras él será cero.
 - Si la presión antes del caudalímetro no supera la pérdida de carga del mismo, no se suministrará caudal, y por tanto la presión nula de suministro al resto de la instalación.
 - Fallo interno del caudalímetro, en concreto en el sistema eléctrico que calienta el sensor térmico. El sensor puede ser calentado por error hasta una temperatura tal que el diferencial sea el correspondiente al de cierre de la válvula interna del caudalímetro (correspondiente a caudales inferiores al mínimo admisible). De esta forma el caudalímetro no suministra gas y por tanto la presión tras este instrumento es nula.
 - Fallo interno del caudalímetro, en concreto en las termorresistencias al medir el diferencial de temperatura. Pueden indicar un diferencial tal que se corresponda con el cierre de la válvula interna del caudalímetro (correspondiente a caudales inferiores al mínimo admisible). Como resultado no se suministra gas y por tanto la presión tras este instrumento es nula.
 - Fallo interno del caudalímetro, en concreto en la válvula interna debido al desgaste.

- Fallo en la válvula antirretorno debido a desgaste por uso.

B. CONSECUENCIAS

EN EL CASO DE FUGAS EN LAS LÍNEAS DE SUMINISTRO

❖ Fuga de hidrógeno gas

El hidrógeno es un gas extremadamente inflamable y explosivo. Pequeñas fugas de hidrógeno pueden provocar consecuencias importantes en el resto de la instalación.

Puede generar atmósferas suboxigenadas por desplazamiento del aire, en recintos o áreas confinadas, semicerradas o mal ventiladas. Por tanto, existe el riesgo de asfixia por disminución del contenido de oxígeno en el aire.

En el caso de estudio, la instalación se encuentra en un recinto confinado. Se dispone de detectores con aviso acústico en caso de concentraciones de peligro para CO y H₂, así como del adecuado sistema de ventilación. Los operarios disponen de la formación adecuada para actuar en casos de fuga de los distintos gases.

CONSECUENCIAS DE SOBREPRESIÓN EN LA TUBERÍA

En el caso en el que el filtro antipartículas se sature y/o que la válvula de retención se cierre por fallo, se tendría de forma análoga una acumulación de gas en todo el tramo de tubería anterior. El caudalímetro seguiría suministrando gas tal y como esté programado, sin tener salida hacia el resto de la instalación. Como resultado la presión tras el caudalímetro aumentaría. Si la diferencia de presión en la entrada y salida del caudalímetro supera los 20 bar, la válvula de control interna del instrumento resultaría dañada.

Puede dar lugar a daños en el caudalímetro si la presión en la línea supera la presión máxima admisible (100 bar). Posibilidad de fugas a través de los sellos de los instrumentos, así como su deterioro si se produce de forma continua y prolongada en el tiempo.

CONSECUENCIAS EN EL CASO DE LÍNEA DE SUMINISTRO DE HIDRÓGENO

La falta de alimentación de hidrógeno al proceso supone reacción quedara incompleta. No supone fallos ni riesgos para la instalación. Si cabe tener en cuenta las pérdidas económicas que supone la operación del proceso.

C. MEDIDAS CORRECTIVAS

Medida correctiva 1

Ver nodo 1.

Es de importancia destacar la revisión y mantenimiento de la válvula y manómetros del manorreductor, así como de los filtros antipartículas y de las válvulas antirretorno.

Medida correctiva 6

Ver nodo 1.

NODO 4: SUMINISTRO DE HIDROGENO
VARIABLE: PRESIÓN/CAUDAL DE SUMINISTRO
PALABRA CLAVE: MENOS
DESVIACIÓN: Presión/caudal real suministrada menor a la deseada

En este caso se tiene como referencia presión (y caudal) real menor al requerido tras las válvulas de retención. Se analizará las causas posibles para una línea de suministro genérica y posteriormente las consecuencias para cada línea en particular.

A. CAUSAS POSIBLES

Las mismas que CAUSAS POSIBLES (**)

B. CONSECUENCIAS

EN EL CASO DE FUGAS EN LAS LÍNEAS DE SUMINISTRO

Las consecuencias de las fugas para cada gas de alimentación al proceso son análogas a las descritas anteriormente en la desviación "NO" para la variable de operación presión.

En el caso de estudio, la instalación se encuentra en un recinto confinado. Se dispone de detectores con aviso acústico en caso de concentraciones de peligro, así como del adecuado sistema de ventilación. Los operarios disponen de la formación adecuada para actuar en casos de fuga de los distintos gases.

CONSECUENCIAS EN EL CASO DE LÍNEA DE SUMINISTRO DE HIDRÓGENO

La falta de alimentación de hidrógeno al proceso supone reacción quedara incompleta. No supone fallos ni riesgos para la instalación. Si cabe tener en cuenta las pérdidas económicas que supone la operación del proceso.

CONSECUENCIAS EN LOS REACTORES (NODOS 2 Y 3)

No se produce efectos a tener en cuenta en los reactores. La menor alimentación de cualquiera de ellos supone la presencia de parte de reactivos no reaccionados y la falta de parte de productos no formados.

Debido a la acción correctora del lazo de control de proceso se mantiene la presión de operación y el tiempo de residencia en los reactores.

C. MEDIDAS CORRECTIVAS

Medida correctiva 1

Ver nodo 1.

Es de importancia destacar la revisión y mantenimiento de la válvula y manómetros del manorreductor, así como de los filtros antipartículas y de las válvulas antirretorno.

Medida correctiva 7

Ver nodo 1.

NODO 4: SUMINISTRO DE HIDROGENO
VARIABLE: PRESIÓN/CAUDAL DE SUMINISTRO
PALABRA CLAVE: MAS
DESVIACIÓN: Presión/caudal real suministrada mayor a la deseada

En este caso se tiene como referencia presión (y caudal) real mayor al requerido tras las válvulas de retención. Se analizará las causas posibles para una línea de suministro genérica y posteriormente las consecuencias para cada línea en particular.

A. CAUSAS POSIBLES

Las mismas que CAUSAS POSIBLES (**)

B. CONSECUENCIAS

EN EL CAUDALÍMETRO

En el caso de que la presión de operación sea la máxima posible, si la presión real disponible aguas arriba del caudalímetro es superior a 100 bar, o si la diferencia de presión en el mismo es mayor a 20 bar, éste se vería dañado e inutilizado debido a que está por encima del valor máximo admisible por dicho instrumento. Puede provocar fugas a través de los sellos internos del mismo. Las consecuencias derivadas de las fugas de cada gas han sido analizadas anteriormente en el Nodo 2 en la palabra clave "NO".

CONSECUENCIAS EN LOS REACTORES (NODOS 2 y 3) Y VÁLVULA DE CONTROL V3

En el caso de los reactores no se tendrían fallos de operación ni de seguridad debido a la acción del lazo de control de presión. Ante una desviación, el lazo de control de presión tendrá en cuenta la diferencia de presión entre la entrada y salida de los reactores, sin distinguir entre compuestos químicos. Supondría pérdidas económicas debidas al exceso de reactivos.

C. MEDIDAS CORRECTIVAS

Medida correctiva 8

Ver nodo 1.

4.2.2.1. Análisis cuantitativo de riesgos con Matrices IPERC (Identificación de Peligros y la Evaluación de Riesgos y Controles)

Las matrices de riesgo de cada área operativa incluyendo el reformado de vapor de agua están realizadas en este apartado.

La evaluación de riesgos corresponde al proceso de determinar la probabilidad de que ocurran eventos específicos y la magnitud de sus consecuencias, mediante el uso sistemático de la información disponible.

Para evaluar el nivel del riesgo (NR), se usa la siguiente ecuación 4.2

$$NR = NP * NC \quad (4.2)$$

En donde:

NP = Nivel de probabilidad
NC = Nivel de consecuencia

A su vez, para determinar el nivel de probabilidad (NP) se requiere la ecuación:

$$NP = ND * NE \quad (4.3)$$

En donde:

ND = Nivel de deficiencia
NE = Nivel de exposición

Tabla 4.6. Determinación del nivel de deficiencia

Nivel de deficiencia	Valor de ND	Significado
Muy alto (MA)	10	Se ha(n) detectado peligro (s) que determina (n) como posible la generación de incidentes, o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes respecto al riesgo es nula o no existe.
Alto (A)	6	Se ha (n) detectado algún (os) peligro (s) que pueden dar lugar a incidentes significativa (s), o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes es baja, o ambos.
Medio (M)	2	Se han detectado peligros que pueden dar lugar a incidentes poco significativos o de menos importancia, o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes es moderada, o ambos.
Bajo (B)	Sin valor asignado	No se ha detectado peligro o la eficacia del conjunto de medidas preventivas existentes es alta, o ambos. El riesgo está controlado. Estos peligros se clasifican directamente en el nivel del riesgo y de intervención cuatro (IV).

Fuente: GTC 45, 2022

Para determinar el nivel de exposición (NE) se aplicaron los siguientes criterios:

Tabla 4.7. Determinación del nivel de exposición.

Nivel de exposición	Valor de NE	Significado
Continua (EC)	4	La situación de exposición se presenta sin interrupción o varias veces con tiempo prolongado durante la jornada laboral.
Frecuente (EF)	3	La situación de exposición se presenta varias veces durante la jornada laboral.
Ocasional (EO)	2	La situación de exposición se presenta alguna vez durante la jornada laboral y por un periodo de tiempo corto.
Esporádica (EE)	1	La situación de exposición se presenta de manera eventual.

Fuente: GTC 45, 2022

Para determinar el nivel de probabilidad (NP), se combinan los resultados de las tablas 4.6 y 4.7, en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Determinación del nivel de probabilidad

Nivel de probabilidad		Nivel de exposición (NE)			
		4	3	2	1
Nivel de deficiencia	10	MA - 40	MA - 30	A - 20	A - 10
	6	MA - 24	A - 18	A - 12	M - 6
	2	M - 8	M - 6	B - 4	B - 2

Fuente: GTC 45, 2022

El resultado de la Tabla 4.8 se interpreta de acuerdo con el significado que aparece en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. Significado de los diferentes niveles de probabilidad

Nivel de probabilidad	Valor de NP	Significado
Muy Alto (MA)	Entre 40 y 24	Situación deficiente con exposición continua, o muy deficiente con exposición frecuente.
Alto (A)	Entre 20 y 10	Situación deficiente con exposición frecuente u ocasional, o bien situación muy deficiente con exposición ocasional esporádica. La materialización del riesgo es posible que suceda varias veces en la vida laboral.
Medio (M)	Entre 8 y 6	Situación deficiente con exposición esporádica, o bien situación mejorable con exposición continuada o frecuente.
Bajo (B)	Entre 4 y 2	Situación mejorable con exposición ocasional o esporádica, o situación sin anomalía destacable con cualquier nivel de exposición. No es esperable que se materialice el riesgo, aunque puede ser concebible.

Fuente: GTC 45, 2022

Tabla 4.10. Determinación del nivel de consecuencia.

Nivel de consecuencia	NC	Significado
		Daños personales
Mortal o Catastrófico (M)	100	Muerte (s)
Muy grave (MG)	60	Lesiones o enfermedades graves irreparables (incapacidad permanente parcial o invalidez)
Grave (G)	25	Lesiones o enfermedades con incapacidad laboral temporal (LTI)
Leve (L)	10	Lesiones o enfermedades que no ameritan discapacidad.

Fuente: GTC 45, 2022

Los resultados de las tablas 4.9 y 4.10 se combinan en la tabla 4.11 para obtener el nivel del riesgo, el cual se interpreta de acuerdo con los criterios de la tabla 4.12.

Tabla 4.11 Determinación del nivel del riesgo

Nivel de riesgo y de intervención NR = NP x NC		Nivel de probabilidad			
		40 - 24	20 - 10	8 - 6	4 - 2
Nivel de consecuencia (NC)	100	I 4000 – 2400	I 2000 – 1000	I 800 – 600	II 400 – 200
	60	I 2400 – 1440	I 1200 – 600	II 480 – 360	II 240 II I 120
	25	I 1000 – 600	II 500 – 250	II 200 – 150	III 100 – 50
	10	II 400 - 240	II 200 III 100	III 80 – 60	III 40 IV 20

Fuente: GTC 45, 2022

Tabla 4.12. Significado del nivel del riesgo

Nivel de riesgo	Valor de NR	Significado
I	4000 – 600	Situación crítica. Suspender actividades hasta que el riesgo esté bajo control. Intervención urgente.
II	500 – 150	Corregir y adoptar medidas de control inmediato
III	120 – 40	Mejorar si es posible. Sería conveniente justificar la intervención y su rentabilidad.
IV	20	Mantener las medidas de control existentes, pero se deberían considerar soluciones o mejoras y se deben hacer comprobaciones periódicas para asegurar que el riesgo aún es aceptable.

Fuente: GTC 45, 2022

Tabla 4.13. Aceptabilidad del riesgo

Nivel de riesgo	Significado	Explicación
I	No aceptable	Situación crítica
II	No aceptable o Aceptable con control específico	Corregir adoptar medidas de control
III	Mejorable	Mejorar el control existente
IV	Aceptable	No intervenir, salvo que un análisis más preciso lo justifique.

Fuente: GTC 45, 2022

En el proceso de hidrotratamiento de aceite de palma se concluyó que los procesos de mayor riesgo son los siguientes

- Operación de los reactores, por la alta probabilidad en fallas del tipo mecánico y falta de resistencia en el material de construcción de estos equipos.
- Sistemas de tuberías presurizadas, por el riesgo de que escapen gases a alta presión y temperatura.
- Operación de la torre destiladora, por el alto ruido que produce durante su operación.
- Operaciones en la unidad de regeneración de hidrogeno, por el uso del compresor principalmente este puede presentar fallas mecánicas y de resistencia de los materiales de construcción.
- Fallas del operario de los equipos.

Se construyeron las matrices de riesgos de cada área operativa del proceso utilizando el método cuantitativo basado en la norma GTC 45. La tabla 4.14 muestra los resultados del nivel de riesgo en cada tarea de los procedimientos individuales que involucra cada etapa operativa.

Tabla 4.14. Matriz de identificación de peligros y valoración de riesgos para el proceso HVO

PROCESO (ETAPA)	ÁREA	ACTIVIDAD	TAREAS	RUTINARIA (SI o NO)	PELIGRO	Efectos posibles	Evaluación del Riesgo					Valoración del riesgo	Criterios para establecer controles		Medidas de intervención						
							ND	NE	NP= (ND x NE)	Interpretación del NP	NC		NR	Interpretación del NR	Por consecuencia	Existencia de requisito	Eliminación	Sustitución	Controles de ingeniería	Controles administrativos, señalización, advertencia	Equipos / Elementos de protección personal
Reformado con vapor de agua	OPERACIÓN EN PLANTA	Operación del reactor	Tuberías de presión	SI	Incidio y explosión por altas presiones.	Lesiones personales incluye fatalidad.	6	3	18	ALTO	25	450	II	NO	Lesiones personales incluye fatalidad.	NO				Señalización del área advirtiendo el nivel del ruido y el uso de EPP.	Uso de EPP adecuado: ropa adecuada, casco, botas y protección visual.
Reformado con vapor de agua	OPERACIÓN EN PLANTA	Operación de intercambiadores de calor.	Intercambiadores de calor.	SI	Pérdida de integridad mecánica	Lesiones al personal.	2	3	6	MEDIO	25	150	II	NO	Lesiones al personal.	NO				Implementación de programas de mantenimiento preventivo y predictivo. Programa de inspecciones periódicas. Certificación de equipos, tuberías, accesorios e instrumentos.	Uso de EPP adecuado: ropa adecuada, casco, botas y protección visual.
Reformado con vapor de agua	OPERACIÓN EN PLANTA	Operación del reactor	Operación de reactores	SI	Ruido	Lesiones auditivas progresivas llegando a producir hipoacusia	6	3	18	ALTO	25	450	II	NO	Hipoacusia, alteraciones del campo visual, agudeza visual, trastornos del sueño, irritabilidad, cansancio.	SI				Señalización del área advirtiendo el nivel del ruido y el uso de EPP.	Uso de tapa oídos de inserción y de copa. Cumplimiento a los exámenes médicos periódicos. Implementación de programa de vigilancia epidemiológica (PVE). Conservación auditiva.
Reformado con vapor de agua	OPERACIÓN EN PLANTA	Operación del reactor	Operación de reactores	SI	Gases y vapores de líquidos	Irritación cutánea, ojos y tracto respiratorio.	2	3	6	MEDIO	10	60	III	NO	Irritación cutánea, ojos y tracto respiratorio.	NO				Señalización: no comer, no fumar en el sitio de trabajo. Rotular los recipientes con etiquetas HMIS III. Eliminar fuentes de ignición.	Protección visual para uso de productos químicos. Guantes protectores de caucho, respirador con filtro para vapores orgánicos.
DESOXIGENACIÓN	OPERACIÓN EN PLANTA	Operación del reactor	Operación del reactor	SI	Ruido	Lesiones auditivas progresivas llegando a producir hipoacusia				MEDIO	10	80	III	NO	Hipoacusia, alteraciones del campo visual, agudeza visual, trastornos del sueño, irritabilidad, cansancio.	SI		Uso de barreras anti ruido. Colocar los compresores dentro infraestructura tipo container.	Señalización del área advirtiendo el nivel del ruido y el uso de EPP.	Uso de tapa oídos de inserción y de copa. Cumplimiento a los exámenes médicos periódicos.	
DESOXIGENACIÓN	OPERACIÓN EN PLANTA	Operación del reactor	Operación del reactor	SI	Altas temperaturas	Golpe de calor y deshidratación	2	4	8	MEDIO	10	80	III	NO	Deshidratación	NO				Implementación de Sistema de Permisos de Trabajo. Señalización. Instalación de puntos de hidratación.	Uso de EPP adecuado. Ropa de material y diseño adecuado.

OPERACIÓN EN PLANTA DESOXIGENACIÓN	Operación de reactor Sistemas y tuberías presurizadas.	SI	Incendio y/o explosión.	Fisicoquímico	Quemaduras, fatalidades, traumas y lesiones	6	3	18	ALTO	25	450	II	NO	Lesiones personales, quemaduras	SI			Implementación de Programa de Bloqueo y Etiquetado. Señalización de advertencia de riesgo eléctrico. Inspecciones periódicas a sistemas de electricidad. Implementación de PTW y ATS.	Uso de EPP adecuado. Botas de seguridad, casco de seguridad, guantes protección visual.	
OPERACIÓN EN PLANTA DESOXIGENACIÓN	Operación de reactor Sistemas y tuberías presurizadas.	SI	Escape de gas a alta presión y altas temperaturas.	Físico	Contusiones, fracturas, quemaduras.	6	3	18	ALTO	25	450	II	NO	Lesiones personales, quemaduras.	SI			Uso de material resistente a alta presión. Selección de equipos, instrumentación y materiales adecuado al fluido y presiones a manejar.	Implementación de Programa de Mantenimiento Preventivo y Predictivo; inspecciones periódicas. Programa de manejo de integridad de equipos y tuberías. Implementación de señales de advertencia.	Uso de EPP adecuado. Botas de seguridad, casco de seguridad, guantes protección visual.
OPERACIÓN EN PLANTA DESOXIGENACIÓN	Operación del separador. Separación Gas – Líquido	SI	Escape de gas a alta presión y altas temperaturas.	Físico	Contusiones, lesiones fracturas, quemaduras.	2	2	4	BAJO	25	100	III	NO	Lesiones personales, quemaduras	NO			Selección adecuada del tipo de separador de acuerdo con la presión a manejar. Mantener los estándares de diseño de materiales y condiciones del equipo de acuerdo con los parámetros del fluido a manejar.	Señalización de advertencia (no fumar, peligro, uso de EPP). Implementación de programa de inspecciones periódicas, mantenimiento preventivo y predictivo. Implementación de PTW y ATS.	Uso de EPP adecuado. Botas de seguridad, casco de seguridad, guantes protección visual
OPERACIÓN EN PLANTA DESOXIGENACIÓN	Operación de reactor Sistemas y tuberías presurizadas.	SI	Incendio y/o explosión.	Fisicoquímico	Quemaduras, fatalidades, traumas y lesiones.	6	3	18	ALTO	60	1080	I	NO	Fatalidades, lesiones graves.	SI			Material del equipo resistente a la presión a manejar. Pruebas de resistencia de materiales.	Implementación de programa de mantenimiento predictivo y preventivo. Inspecciones periódicas. Equipos e instrumentación calibrados con patrones certificados. Señalización. Aplicación de programa de aislamiento de energía (Bloqueo y etiquetado). Personal competente y entrenado. Implementación de PTW y ATS.	Uso de EPP adecuado. Ropa, calzado, protección visual, auditiva, de manos.
OPERACIÓN EN PLANTA DESOXIGENACIÓN	Separación G-L Separación de los productos de la reacción	SI	Vibraciones	Físico	Enfermedad profesional.	2	2	4	BAJO	25	100	III	NO	Enfermedad profesional	SI			Instalación de equipos que disminuyan la vibración.	Programa de mantenimiento e inspecciones periódicas.	Exámenes médicos periódicos.

SEPARACIÓN DE FLUIDOS	OPERACIÓN TORRE	SI	Exposición y contacto con químicos	Químico	Irritación cutánea y de ojos. Náuseas, dolor de cabeza.	2	3	6	MEDIO	10	60	III	NO	Irritación cutánea y de ojos, malestar general.	NO				Entrenamiento en manipulación de productos químicos, marcado y etiquetado de productos químicos, implementación del sistema MSDS (Material Safety Data Sheet). Personal capacitado en manipulación de estos productos químicos.	Uso de EPP adecuado para la manipulación de aminas: Lentes de seguridad, guantes especiales, botas de seguridad, delantal, máscaras para manipulación de estos productos (respiradores).
SEPARACIÓN DE FLUIDOS	Tuberías presurizadas	SI	Superficies de trabajo irregulares, deslizantes, con diferencia de nivel.	Locativo	Lesiones, contusiones, golpes, esguinces, fracturas.	2	3	6	MEDIO	10	60	III	NO				Adecuación de pisos en caso de presentarse desniveles.		Inspecciones previas al lugar de trabajo. Orden y aseo en el lugar de trabajo. Señales de precaución y advertencia, peligro, desnivel	Uso de botas de seguridad y EPP adecuado.
SEPARACIÓN DE FLUIDOS	Tuberías presurizadas	SI	Inadecuado orden y aseo	Locativo	Lesiones, contusiones, golpes, esguinces, fracturas.	2	3	4	BAJO	10	40	III	NO	Golpes, esguinces.	NO				Inspecciones previas al lugar de trabajo. Orden y aseo en el lugar de trabajo. Señales de advertencia.	Uso de botas de seguridad y EPP adecuado.
SEPARACIÓN DE FLUIDOS	Re hervidor.	SI	Altas temperaturas	Físico	Quemaduras.	2	1	2	BAJO	25	50	III	NO	Quemaduras	NO		Implementar sistemas aislantes para evitar contacto de alta temperatura con el trabajador.	Mantenimiento preventivo y predictivo. Señalización de advertencia de peligro, altas temperaturas, solo personal autorizado, uso de EPP. Personal que deba entrar en contacto con el equipo.	Uso de botas de seguridad y EPP adecuado	
SEPARACIÓN DE FLUIDOS	Operación topping	SI	RUIDO	FÍSICO	Lesiones auditivas progresivas, llegando a producir hipoacusia.	6	3	18	ALTO	25	450	II	NO	Hipoacusia, alteraciones del campo visual, agudeza visual, trastornos del sueño, irritabilidad, cansancio,	SI			Señalización del área advirtiendo el nivel del ruido y el uso de EPP.	Uso de tapa oídos de inserción y de copa. Cumplimiento a los exámenes médicos periódico.	

Almacenamiento de Aminas.	SI	Incendio y/o explosión.	Fisicoquímico	Lesiones personales, quemaduras.	6	2	12	MEDIO	10	120	III	NO	Quemaduras	NO	Evitar mezclar con agentes oxidantes tales como: percloratos, nitratos, permanganatos, cromatos, ácido nítrico, halógenos, peróxidos y algunas soluciones para limpieza.	Entrenamiento en manipulación de productos químicos, marcación y etiquetado de productos químicos, implementación del sistema MSDS (Material Safety Data Sheet). Personal capacitado em manipulación de estos productos químicos. Implementación de Matriz de Compatibilidad de Productos Químicos.	Uso de EPP para el manejo de aminas: Lentes de seguridad, guantes especiales, botas de seguridad, delantal, máscaras para manipulación de estos productos.
Separador de Aminas.	SI	Exposición a gases, vapores, manipulación y contacto con aminas	Químico	Irritación cutánea y de ojos. Náuseas, dolor de cabeza.	2	3	6	MEDIO	10	60	III	NO	Irritación cutánea y de ojos, malestar general.	NO		Entrenamiento en manipulación de productos químicos, marcación y etiquetado de productos químicos, implementación del sistema MSDS (Material Safety Data Sheet). Personal capacitado em manipulación de estos productos químicos. Implementación de Matriz de Compatibilidad de Productos Químicos.	Uso de EPP para el manejo de aminas: Lentes de seguridad, guantes especiales, botas de seguridad, delantal, máscaras para manipulación de estos productos. Respiradores.
Funcionamiento del compresor	SI	Falta de resistencia del material	Mecánico	Laceraciones, heridas, contusiones.	6	2	12	ALTO	25	300	II	NO	Laceraciones, heridas, contusiones.	NO	Instalación de Compresores con calidad certificada y comprobada resistencia de materiales acorde a los requisitos exigidos.	Implementación de programa de inspecciones periódicas y mantenimiento predictivo y preventivo.	Uso de EPP adecuado. Botas de seguridad, casco de seguridad, guantes protección visual.
Almacenamiento de Aminas.	SI	Incendio y/o explosión.	Fisicoquímico	Lesiones personales, quemaduras.	6	2	12	MEDIO	10	120	III	NO	Quemaduras	NO	Evitar mezclar con agentes oxidantes tales como: percloratos, nitratos, permanganatos, cromatos, ácido nítrico, halógenos, peróxidos y algunas soluciones para limpieza.	Entrenamiento en manipulación de productos químicos, marcación y etiquetado de productos químicos, implementación del sistema MSDS (Material Safety Data Sheet). Personal capacitado em manipulación de estos productos químicos. Implementación de Matriz de Compatibilidad de Productos Químicos.	Uso de EPP para el manejo de aminas: Lentes de seguridad, guantes especiales, botas de seguridad, delantal, máscaras para manipulación de estos productos.
Almacenamiento de Aminas.	SI	Exposición a gases, vapores, manipulación y contacto con aminas	Químico	Irritación cutánea y de ojos. Náuseas, dolor de cabeza.	2	3	6	MEDIO	10	60	III	NO	Irritación cutánea y de ojos, malestar general.	NO		Entrenamiento en manipulación de productos químicos, marcación y etiquetado de productos químicos, implementación del sistema MSDS (Material Safety Data Sheet). Personal capacitado em manipulación de estos productos químicos. Implementación de Matriz de Compatibilidad de Productos Químicos.	Uso de EPP para el manejo de aminas: Lentes de seguridad, guantes especiales, botas de seguridad, delantal, máscaras para manipulación de estos productos. Respiradores.
Almacenamiento de Aminas.	SI	Falta de resistencia del material	Mecánico	Laceraciones, heridas, contusiones.	6	2	12	ALTO	25	300	II	NO	Laceraciones, heridas, contusiones.	NO	Instalación de Compresores con calidad certificada y comprobada resistencia de materiales acorde a los requisitos exigidos.	Implementación de programa de inspecciones periódicas y mantenimiento predictivo y preventivo.	Uso de EPP adecuado. Botas de seguridad, casco de seguridad, guantes protección visual.
Almacenamiento de Aminas.	SI	Incendio y/o explosión.	Fisicoquímico	Lesiones personales, quemaduras.	6	2	12	MEDIO	10	120	III	NO	Quemaduras	NO	Evitar mezclar con agentes oxidantes tales como: percloratos, nitratos, permanganatos, cromatos, ácido nítrico, halógenos, peróxidos y algunas soluciones para limpieza.	Entrenamiento en manipulación de productos químicos, marcación y etiquetado de productos químicos, implementación del sistema MSDS (Material Safety Data Sheet). Personal capacitado em manipulación de estos productos químicos. Implementación de Matriz de Compatibilidad de Productos Químicos.	Uso de EPP para el manejo de aminas: Lentes de seguridad, guantes especiales, botas de seguridad, delantal, máscaras para manipulación de estos productos.
Almacenamiento de Aminas.	SI	Exposición a gases, vapores, manipulación y contacto con aminas	Químico	Irritación cutánea y de ojos. Náuseas, dolor de cabeza.	2	3	6	MEDIO	10	60	III	NO	Irritación cutánea y de ojos, malestar general.	NO		Entrenamiento en manipulación de productos químicos, marcación y etiquetado de productos químicos, implementación del sistema MSDS (Material Safety Data Sheet). Personal capacitado em manipulación de estos productos químicos. Implementación de Matriz de Compatibilidad de Productos Químicos.	Uso de EPP para el manejo de aminas: Lentes de seguridad, guantes especiales, botas de seguridad, delantal, máscaras para manipulación de estos productos. Respiradores.
Almacenamiento de Aminas.	SI	Falta de resistencia del material	Mecánico	Laceraciones, heridas, contusiones.	6	2	12	ALTO	25	300	II	NO	Laceraciones, heridas, contusiones.	NO	Instalación de Compresores con calidad certificada y comprobada resistencia de materiales acorde a los requisitos exigidos.	Implementación de programa de inspecciones periódicas y mantenimiento predictivo y preventivo.	Uso de EPP adecuado. Botas de seguridad, casco de seguridad, guantes protección visual.

Fuente: Elaboración propia 2023

4.3. MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR LAS CONSECUENCIAS DE UNA EXPLOSIÓN BLEVE

Se hizo la simulación de consecuencias de los efectos físicos de una explosión tipo BLEVE.

4.3.1. Escenario BLEVE

Para el análisis de consecuencias se debe de hacer la suposición de los escenarios más desfavorables, para así calcular las consecuencias más severas.

En el caso de que por algún motivo los rociadores de agua que se accionan al incidir una flama en el exterior de un tanque no funcionen, entonces sucederá, un aumento en la temperatura del hidrogeno y en subproductos del proceso de hidrotreamiento como ser los componentes ligeros como el propano y la nafta. Esto traerá como consecuencia el aumento de la presión en el interior de los reactores.

Una explosión del tipo BLEVE, es una súbita expansión de la sustancia que se encuentra en fase líquida por acción de la pérdida de presión. Esto puede ser producto de la ruptura del contenedor (reactor) por sobrepasar el límite mecánico. O simplemente por el hecho de elevar la temperatura del hidrogeno y componentes ligeros lo que provoca el aumento de la presión interna provocando el accionamiento de las válvulas de alivio de sobrepresión disminuyendo súbitamente la presión interna. Si este cambio de presión lleva a la sustancia por debajo del límite de sobrecalentamiento para esa presión, entonces todo el contenido cambiará a la fase gaseosa provocando la explosión inmediata, lo que conlleva la generación de una onda de choque y un impulso susceptibles de provocar daños a estructura y pérdidas humanas.

Adicional a la generación de la explosión, si la nube de gas formada se encuentra dentro de los límites de inflamabilidad, existe el riesgo de ocurrencia de una bola de fuego de grandes dimensiones que provocará radiación en los alrededores.

Se simularon las consecuencias por la explosión BLEVE de uno de los reactores, suponiendo un volumen de hidrogeno y componentes livianos de 85% (fase líquida) del volumen del reactor, mismo que se encuentra envuelto en llamas.

La temperatura de ebullición del propano es de 232 K y la temperatura crítica es de 369.8 K. Se hace la suposición de condiciones promedio, es decir, que la temperatura ambiente es de 302 K en la ubicación de la refinería Guillermo Elder Bell. Se puede inferir que alcanzar la temperatura crítica es relativamente sencillo al estar el reactor expuesto a un incendio externo. A continuación, se describen los pasos utilizados para la predicción de efectos físicos:

Paso 1. Determinación de datos de partida:

Según el autor Ing. Cristian Emmanuel González Reyes en su tesis “Análisis de los modelos matemáticos para la evaluación de consecuencias por derrames, fugas, explosiones e incendios provocados por desastres químicos” la presión máxima es de 1.21 veces la presión a la que se acciona los sistemas de seguridad. Por ello la presión absoluta del reactor se obtiene de la siguiente forma:

$$P_1 = 1.21 * 1.5 \text{ MPa} + 0.1017 \text{ MPa} = 1.9167 \text{ MPa}$$

Los datos utilizados son:

Volumen del reactor = 29600 litros
 Presión atmosférica local (palmasola) = 0.1017 MPa
 Presión máxima de seguridad = 1.5 MPa
 Volumen ocupado por liquido = 35%

Tabla 4.15. Datos termodinámicos del Propano

$T_1(K)$	$p_1(MPa)$	$h_f(\frac{kJ}{kg})$	$h_g(\frac{kJ}{kg})$	$v_f(\frac{m^3}{kg})$	$v_g(\frac{m^3}{kg})$	$s_f(\frac{kJ}{kg * K})$	$s_g(\frac{kJ}{kg * K})$
327,7	1,90	674,31	948,32	0,002278	0,0232	4,7685	5,6051
230,9	0,10	421,27	849,19	0,001722	0,419	3,8721	5,7256

Fuente: Reyes, 2011

Fue necesario determinar la energía de explosión obteniendo, en primer lugar, el trabajo específico que tiene la sustancia en la fase líquida y gaseosa en el momento de la falla, esto con ayuda de las características termodinámicas.

Para este cálculo se siguió la siguiente metodología; se determinó la energía de la explosión por medio de las características termodinámicas del propano obtenidas de la bibliografía y mostradas en la tabla 4.15, haciendo la suposición de que las sustancias involucradas en la explosión son propano y butano en una proporción 80% y 20%, respectivamente en la mezcla de vapor. La mezcla líquida está compuesta en un 50% de cada uno de los componentes.

Este método el cual se basa en determinar las energías internas se muestra a continuación:

Para determinar la energía interna en ambas fases, suponiendo únicamente propano, se utilizó la ecuación 4.4.

$$h = u + pv \tag{4.4}$$

Donde:

h = Entalpía por unidad de masa[J/kg]
 u = Energía interna específica[J/kg]
 p = Presión absoluta al momento de falla[N/m²]
 v = Volumen específico[m³/kg]

Para determinar las energías internas específicas de cada una de las fases, los valores de la tabla 4.16 se sustituyeron en la ecuación 4.4.

Para determinar la energía interna del líquido saturado se sustituyen los valores en la ecuación 4.4.

$$u = h - pv$$

$$u = 674.31 \times 10^3 - 1.888 \times 10^6 \frac{N}{m^2} \times 0.002278 \text{ m}^3/kg$$

$$u = 670009.136 \text{ J/kg}$$

Para determinar la energía interna del vapor saturado se sustituyen los valores en la ecuación 4.4.

$$u = h - pv$$

$$u = 948.32 \times 10^3 - 1.888 \times 10^6 \frac{N}{m^2} \times 0.0232 \text{ m}^3/kg$$

$$u = 904518.4 \text{ J/kg}$$

Es necesario obtener la energía interna específica después de la expansión a presión ambiental (u_2) y se calculó con la ecuación 4.5.

$$u_2 = (1 - X)h_f + Xh_g - (1 - X)p_0v_f - Xp_0v_g \quad (4.5)$$

donde:

$u_2 =$ energía interna específica después de la expansión proporción de vapores

$X =$ proporción vapores

Fue necesario obtener la proporción de vapores con la expresión 4.6.

$$X = \frac{s_1 - s_f}{s_g - s_f} \quad (4.6)$$

donde:

$s =$ Entropía específica

En la ecuación 4.6, el subíndice 1 significa el estado inicial, f se refiere al líquido y la g al gas.

Se calculó de entropía específica del líquido saturado sustituyendo los valores correspondientes de la tabla 4.16 en la ecuación 4.6.

$$X = \frac{4.7685 - 3.8721}{5.7256 - 3.8721} = 0.4836$$

Así mismo, se sustituyeron los valores en la ecuación 4.4 de la energía interna u_2

$$u_2 = (1 - 0.4836) * 421270 + 0.4836 * 849190 - (1 - 0.4836) * 73000 * 0.001722 - 0.4836 * 73000 * 0.419$$

$$u_2 = 613355.32 \text{ J/kg}$$

Se obtuvo la proporción de vapores para el vapor saturado sustituyendo en la ecuación 4.6.

$$X = \frac{5.6051 - 3.8721}{5.7256 - 3.8721} = 0.935$$

Por último, sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 4.4 de la energía interna u_2 .

$$u_2 = (1 - 0.935) * 421270 + 0.935 * 849190 - (1 - 0.935) * 73000 * 0.001722 - 0.935 * 73000 * 0.419$$

$$u_2 = 792768.18 \text{ J/kg}$$

Se obtuvo el trabajo específico realizado por la expansión con la ecuación 4.7

$$e_{ex} = u_1 - u_2 \quad (4.7)$$

Donde:

$$e_{ex} = \text{Trabajo de expansión [J/kg]}$$

El trabajo específico para el líquido saturado se calculó sustituyendo valores en la ecuación 4.7.

$$e_{ex} = 670009.14 - 613355.32$$

$$e_{ex} = 56653.82 \text{ J/kg}$$

El trabajo específico para el vapor saturado se calculó sustituyendo valores en la ecuación 4.7.

$$e_{ex} = 904518.4 - 792768.18$$

$$e_{ex} = 111750.22 \text{ J/kg}$$

Con los trabajos específicos de expansión se obtuvo la energía de explosión usando la ecuación 4.8.

$$E_{ex} = 2 * e_{ex} * m \quad (4.8)$$

donde:

$$E_{ex} = \text{Energía de expansión [J]}$$

$$m = \text{Masa de la sustancia (kg)}$$

Ahora bien, para el líquido saturado, se tiene:

$$E_{ex} = 2 * 56653.82 \frac{J}{kg} * 0.85 kg * \frac{29.6 m^3}{0.002278 m^3/kg}$$

$$E_{ex} = 1251457516 MJ$$

Y por último se sustituyen los valores para el vapor saturado:

$$E_{ex} = 2 * 111750.22 \frac{J}{kg} * 0.15 kg * \frac{29.6 m^3}{0.0232 m^3/kg}$$

$$E_{ex} = 42773360 MJ$$

Suponiendo la condición más desfavorable, misma que se presenta cuando la energía de expansión del vapor y del líquido son simultáneas, entonces se suman las dos energías:

$$E_{ex} = 1251457516 MJ + 42773360 MJ$$

$$E_{ex} = 1294230876 MJ$$

4.3.2. Escenario INCENDIO FLASH

Sucede cuando una nube de vapor inflamable encuentra un punto de ignición e inicia una deflagración. Tiene como efecto físico la alta radiación térmica en función de la posición del receptor.

Para conocer la cantidad de radiación a la que se encuentra sometido cierto receptor, es necesario conocer, primero, la geometría de la flama posible que se forma en el incendio flash.

El modelo elegido para la determinación de la geometría del incendio es el diseñado por Raj y Emons. Este modelo considera al incendio como una flama turbulenta en dos dimensiones que se desplaza a una velocidad constante. Este modelo está basado en estas consideraciones:

- a) La velocidad del frente de flama es proporcional a la velocidad del viento.
- b) Cuando una nube de vapor se quema, en esta existe siempre un frente de flama que se mueve con velocidad constante y es seguido por una zona ya combustionada.

La metodología para el cálculo de los efectos físicos se muestra a continuación: Dinámica del incendio

La dinámica del incendio flash está determinada por un modelo que relaciona la altura de la flama con la profundidad, composición y velocidad de la flama. Con base en observación experimental, se ha determinado que la velocidad de la flama está estrechamente relacionada con la velocidad del viento.

Por otra parte, la altura de la flama se puede calcular con la siguiente expresión:

$$H = 20D \left[\frac{S^2}{gd} \left(\frac{\rho_0}{\rho_a} \right)^2 \frac{wr^2}{(1-w)^3} \right]^{1/3} \quad (4.9)$$

donde:

H	Altura de la flama visible	[m]
D	Profundidad de la pluma	[m]
S	Velocidad de combustión	[m/s]
g	Aceleración de la gravedad	[m/s ²]
ρ_0	Densidad de la mezcla combustible-aire	[kg/m ³]
ρ_a	Densidad del aire	[kg/m ³]
r	Fracción estequiométrica de masa de la mezcla aire combustible	[-]

$$w = \frac{\phi - \phi_{st}}{\alpha(1 - \phi_{st})} \quad (4.10)$$

$w = 0$; para $\phi < \phi_{st}$ ó igual a ϕ_{st}

α Fracción de expansión de presión para combustión estequiométrica (en el caso de hidrocarburos, vale 8)

ϕ Composición de la mezcla combustible-aire (fracción volumen del combustible)

ϕ_{st} Composición de la mezcla estequiométrica (fracción volumen del combustible)

Para determinar la posición y forma de la flama, se deberá determinar el tiempo de interés. La posición y forma de la flama dependen de la forma de la nube y de la localización de la ignición. Si la nube es una pluma, la forma de la flama se puede aproximar a un plano de sección constante que consume a la pluma en dirección longitudinal. Si por otro lado la forma de la nube es más circular, entonces la forma de la flama estará en función de la localización del punto de ignición. Una ignición central conlleva una flama circular, mientras que en el caso de una ignición en los límites conlleva una forma aplanada en la flama que va cambiando durante la propagación. La forma de la flama es importante para el cálculo de la radiación emitida. Como se verá en este ejemplo de aplicación la forma de la flama incide en un factor de vista, mismo que es una variable utilizada para el cálculo de la radiación.

La radiación recibida por un objeto depende del poder emisor de la flama que está radiando, la orientación de la flama con respecto al objeto y de la atenuación atmosférica

$$q = FE\tau_a \quad (4.11)$$

dónde:

q	Radiación	[W/m ²]
F	Factor de vista	[-]
E	Poder emisor del fuego por unidad de superficie	[W/m ²]

τ_a Coeficiente de atenuación debida a las condiciones atmosféricas [-]

El único valor encontrado en la literatura para el poder emisor (E) de un incendio flash, es el que da Blackmore et al, quien indica que, para el propano y el GLP, el valor del “E” es 173 kW/m².

Se calculó la altura de la flama con los siguientes datos:

Peso molecular del aire = 29 g/mol

Peso molecular del GLP = 49.7 g/mol

Volumen de tanque de GLP = 212500 L

Se calculó la velocidad de la flama con base en la velocidad del viento.

$$S = 2,3 * U_w = 2.3 * 2 \text{ (m/s)} = 4.6 \text{ (m/s)}$$

Donde:

S Velocidad de combustión [m/s]

U_w Velocidad del viento [m/s]

Se calculó la fracción cuadrada de densidades mezcla-aire con el siguiente proceso:

En general cuando se presenta el 10% de gas en la mezcla, la nube tiene una dimensión de 1 metro de profundidad y 100 metros de diámetro. Dicha información sirvió para modelar la forma de la nube que se generaría por la liberación de la totalidad del contenido. Lo anterior tomando en cuenta que los tanques se llenan al 85% por cuestiones de seguridad.

Un litro de gas produce un volumen de mezcla explosiva de 11,500 litros. Si se libera la totalidad del contenido, es decir 212,500 L, entonces se formará una nube de 2443750 m³, la cual tendrá dimensiones aproximadas de 677 m de diámetro con una profundidad de 6.77 m. La densidad de la mezcla se obtiene con un promedio pesado en volumen de las proporciones de los componentes de la mezcla.

$$\left(\frac{\rho_0}{\rho_a}\right)^2 = \left[\frac{0,1 * 49,7 + 0,9 * 29}{29}\right] = 1,148$$

La mezcla estequiométrica se refiere la proporción de GLP presente en la mezcla en el momento de la reacción. Se considera que la proporción es de 4%, en función de los límites de inflamabilidad.

$$r = \frac{(1 - \varphi_{st})M_{aire}}{\varphi_{st} * M_{glp}} = \frac{(1 - 0,04)29}{0,04 * 49,7} = 14,004$$

Se calculó w en función de la composición estequiométrica, de la proporción de GLP en la nube y de la fracción de expansión para una combustión estequiométrica α .

$$w = \frac{0,1 - 0,04}{8(1 - 0,04)} = 0,0078$$

Se calculó la altura de la flama sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 4.9.

$$H = 20 * 6,77 \left[\frac{4,6^2}{9,81 * 6,77} * 1,148 * \frac{0,0078 * 14,004^2}{(1 - 0,0078)^3} \right]^{\frac{1}{3}} = 77,56 \text{ m}$$

Hasta esta parte del proceso de cálculo se determinó la altura de la flama que provocaría un incendio flash de la nube de vapor. Para conocer el ancho de la flama fue necesario definir el instante para el cual se desea conocer la radiación. La razón de lo anterior es el hecho de que la forma de la flama depende de la localización de la ignición y de la forma que tiene la nube en ese instante. Dado que la flama viaja a una velocidad constante desde el sitio de ignición, la flama estará en función del diámetro que se tenga en la nube en cada lugar, por ello es necesario predecir la forma de la nube.

El GLP es más pesado que el aire, por ello la dispersión inicial es radial, después viaja en conjunto en la dirección del viento mientras se dispersa. La forma de la nube es circular.

El ancho de la flama está en función del tiempo, acorde a la ecuación 4.12.

$$W = 2\sqrt{R^2 - (R - St)^2} \quad (4.12)$$

Para conocer el comportamiento de la geometría de la flama se utiliza una hoja de cálculo en la que se determina el ancho de la flama en función del tiempo.

El factor de vista está en función, tanto de la ubicación, como de la orientación del receptor. Un incendio flash es susceptible de modelarse como un plano que viaja a velocidad constante.

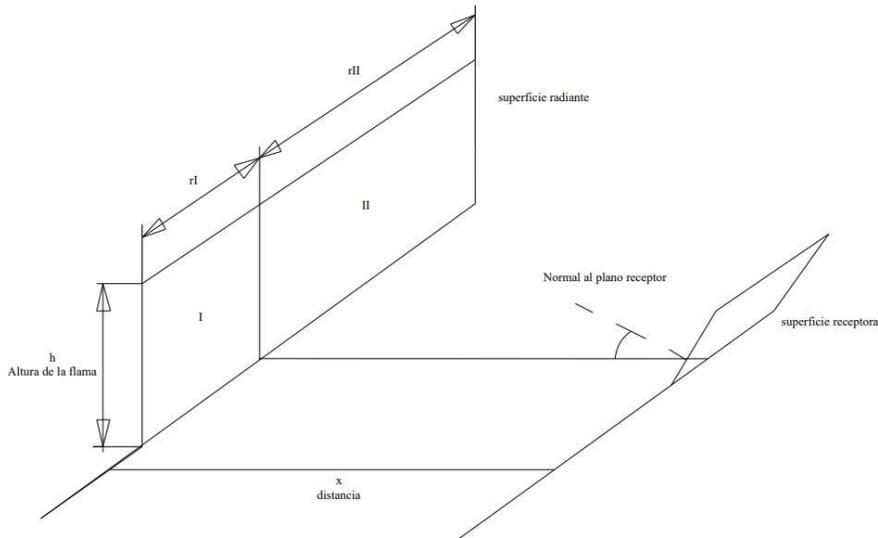
El modelo matemático se basa en la suposición de que la radiación resultante del emisor será la suma de la radiación de dos áreas. La primera es la porción del área radiante que queda del lado izquierdo al corte que hace un plano que pasa por el centro del receptor y que contiene al eje perpendicular a la intersección del receptor y el plano del piso. La segunda es el área radiante restante.

Tabla 4.16. Determinación de la geometría de la flama cada 3 segundos

Tiempo [s]	Altura de la flama	Ancho de la flama
0	77,56	0
3	77,56	191,3338444
6	77,56	267,7569047
9	77,56	324,4308247
12	77,56	370,5312942
15	77,56	409,6437477
18	77,56	443,6203783
21	77,56	473,5679043
24	77,56	500,2105157
27	77,56	524,0525165
30	77,56	545,4612727
33	77,56	564,7135911
36	77,56	582,0235047
39	77,56	597,559838
42	77,56	611,457799
45	77,56	623,8268991
48	77,56	634,7565203
51	77,56	644,3199205
54	77,56	652,5771679
57	77,56	659,5773192
60	77,56	665,3600529
63	77,56	669,9568941
66	77,56	673,3921294
69	77,56	675,6834762
72	77,56	676,8425519
75	77,56	676,8751731
78	77,56	675,7815032
81	77,56	673,5560556
84	77,56	670,1875558
87	77,56	665,6586513
90	77,56	659,9454523
93	77,56	653,0168757
96	77,56	644,833746
99	77,56	635,3475899
102	77,56	624,4990312
105	77,56	612,2156483
108	77,56	598,4090908
111	77,56	582,9711485
114	77,56	565,7682918
117	77,56	546,6339177
120	77,56	525,3570215
123	77,56	501,6650676
126	77,56	475,1969697
129	77,56	445,4581462
132	77,56	411,7405008
135	77,56	372,9664864
138	77,56	327,3442225
141	77,56	271,4423696
144	77,56	196,682892
147	77,56	46,51709363

Fuente. Excel,2023

Figura 4.14. Factor de vista para superficies emisoras plana



Fuente. Scherzer, 1996

Para cada una de las superficies radiantes (I y II) se determinó la radiación máxima y posteriormente se sumaron, esto mediante las ecuaciones

$$h_r = \frac{h}{r}$$

$$X_r = \frac{X}{r}$$

(4.13 – 4.14)

$$A = \frac{1}{(h_r^2 + X_r^2)^{0,5}}$$

$$B = \frac{h_r}{(1 + X_r^2)^{0,5}}$$

(4.15 – 4.16)

Fue necesario determinar los factores de vista, tanto verticales como horizontales, para poder determinar el factor de vista máximo, mediante la obtención de la raíz de la suma de los cuadrados de dichos factores de vista.

En el caso de una superficie horizontal, el factor de vista está dado por la ecuación

$$F_h = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1}\left(\frac{1}{X_r}\right) - AX_r \tan^{-1}(A) \right]$$

(4.17)

En el caso de una superficie vertical, el factor de vista está dado por la ecuación

$$F_v = \frac{1}{2\pi} \left[h_r A \tan^{-1}(A) - \left(\frac{B}{h_r}\right) \tan^{-1}(B) \right]$$

(4.18)

El factor de vista máximo se determina mediante la expresión 4.19.

$$F_{max} = (F_h^2 + F_v^2)^{1/2}$$

(4.19)

Para este caso las áreas son iguales y las dos superficies, es decir el plano que representa al incendio y el plano a analizar son paralelos.

En función de lo anterior, la variable h (ver figura 4.14) será constante para todo momento, sin embargo, X variará (ver figura 4.14) en función del tiempo dado que la flama avanza, en el peor de los escenarios, hacia el receptor. La distancia varía acorde a la expresión 5.10.

$$X = (38+R)-St \text{ [m]} \quad (4.20)$$

La tabla 4.17 muestra las distancias calculadas entre flama y receptor a cada 3 segundos desde la ignición.

Tabla 4.17. Distancia entre flama y receptor a cada 3 segundos

tiempo [s]	altura de la flama	Ancho de la flama	Distancia X
0	77,56	0	376,5
3	77,56	191,3338444	362,7
6	77,56	267,7569047	348,9
9	77,56	324,4308247	335,1
12	77,56	370,5312942	321,3
15	77,56	409,6437477	307,5
18	77,56	443,6203783	293,7
21	77,56	473,5679043	279,9
24	77,56	500,2105157	266,1
27	77,56	524,0525165	252,3
30	77,56	545,4612727	238,5
33	77,56	564,7135911	224,7
36	77,56	582,0235047	210,9
39	77,56	597,559838	197,1
42	77,56	611,457799	183,3
45	77,56	623,8268991	169,5
48	77,56	634,7565203	155,7
51	77,56	644,3199205	141,9
54	77,56	652,5771679	128,1
57	77,56	659,5773192	114,3
60	77,56	665,3600529	100,5
63	77,56	669,9568941	86,7
66	77,56	673,3921294	72,9
69	77,56	675,6834762	59,1
72	77,56	676,8425519	45,3
75	77,56	676,8751731	31,5
78	77,56	675,7815032	17,7
81	77,56	673,5560556	3,9
84	77,56	670,1875558	-9,9

Fuente. Excel,2023

El factor de vista tanto horizontal como vertical está en función de Xr y hr. La tabla 4.18 muestra los valores de Xr y hr a cada 3 segundos de iniciada la ignición.

En la tabla 4.18 se observa que la flama tarda aproximadamente 84 segundos en llegar al receptor, desde el sitio de ignición hasta el receptor. Se calcularon los factores de vista horizontales y verticales para cada una de las áreas del plano radiante (izquierdo y derecho) y se determinó el valor del factor de vista máximo.

Tabla 4.18. Variables para la obtención del factor de vista a cada 3 segundos

tiempo [s]	altura de la flama	Ancho de la flama	Dis-tancia X	Xr	hr	A	B	Fh	Fv	F
3	77,56	191,3338444	362,7	0,948	1,769	0,498	1,284	0,095	0,170	0,389
6	77,56	267,7569047	348,9	0,652	1,264	0,703	1,059	0,113	0,195	0,452
9	77,56	324,4308247	335,1	0,516	1,043	0,859	0,927	0,124	0,207	0,483
12	77,56	370,5312942	321,3	0,434	0,914	0,989	0,838	0,132	0,214	0,503
15	77,56	409,6437477	307,5	0,375	0,826	1,102	0,774	0,138	0,219	0,518
18	77,56	443,6203783	293,7	0,331	0,763	1,202	0,724	0,144	0,223	0,530
21	77,56	473,5679043	279,9	0,296	0,715	1,293	0,685	0,149	0,226	0,541
24	77,56	500,2105157	266,1	0,266	0,677	1,375	0,654	0,154	0,229	0,551
27	77,56	524,0525165	252,3	0,241	0,646	1,451	0,628	0,159	0,231	0,560
30	77,56	545,4612727	238,5	0,219	0,621	1,520	0,606	0,163	0,233	0,570
33	77,56	564,7135911	224,7	0,199	0,599	1,583	0,588	0,168	0,235	0,578
36	77,56	582,0235047	210,9	0,181	0,582	1,642	0,572	0,173	0,237	0,587
39	77,56	597,559838	197,1	0,165	0,566	1,695	0,559	0,178	0,239	0,595
42	77,56	611,457799	183,3	0,150	0,554	1,744	0,547	0,183	0,240	0,603
45	77,56	623,8268991	169,5	0,136	0,543	1,788	0,538	0,188	0,242	0,612
48	77,56	634,7565203	155,7	0,123	0,533	1,827	0,529	0,192	0,243	0,620
51	77,56	644,3199205	141,9	0,110	0,525	1,863	0,522	0,197	0,244	0,628
54	77,56	652,5771679	128,1	0,098	0,519	1,894	0,516	0,202	0,245	0,636
57	77,56	659,5773192	114,3	0,087	0,513	1,921	0,511	0,207	0,246	0,644
60	77,56	665,3600529	100,5	0,076	0,509	1,944	0,507	0,212	0,247	0,652
63	77,56	669,9568941	86,7	0,065	0,505	1,963	0,504	0,217	0,248	0,659
66	77,56	673,3921294	72,9	0,054	0,503	1,978	0,502	0,223	0,248	0,667
69	77,56	675,6834762	59,1	0,044	0,501	1,989	0,500	0,228	0,249	0,675
72	77,56	676,8425519	45,3	0,033	0,500	1,995	0,500	0,233	0,249	0,682
75	77,56	676,8751731	31,5	0,023	0,500	1,997	0,500	0,238	0,250	0,690
78	77,56	675,7815032	17,7	0,013	0,501	1,996	0,501	0,243	0,250	0,698
81	77,56	673,5560556	3,9	0,003	0,503	1,990	0,503	0,249	0,250	0,705
84	77,56	670,1875558	-9,9	- 0,007	0,505	1,980	0,505	- 0,246	0,250	0,702

Fuente. Excel,2023

El coeficiente de atenuación por acción del medio se obtuvo con la ecuación

$$\tau_a = \log(14,1RH^{-0,108}x^{-0,13}) \quad (4.21)$$

donde:

τ_a Coeficiente de atenuación [-]

X Distancia entre el emisor y el receptor [m]

RH Humedad relativa [%]

Con base en la información encontrada en el Plan Municipal de Desarrollo Urbano del departamento de Santa Cruz, se estableció que la humedad relativa promedio diaria es de 55%. Es factible el cálculo del coeficiente de atenuación con base en el cálculo de la distancia entre el emisor y el receptor mostrado en la tabla 4.17. Los coeficientes de atenuación para cada tiempo se muestran en la tabla 4.19.

Tabla 4.19. Cálculo del Coeficiente de atenuación

Tiempo [s]	Distancia X	HR %	Ta
3	362,7	55	0,629
6	348,9	55	0,631
9	335,1	55	0,633
12	321,3	55	0,635
15	307,5	55	0,638
18	293,7	55	0,640
21	279,9	55	0,643
24	266,1	55	0,646
27	252,3	55	0,649
30	238,5	55	0,652
33	224,7	55	0,656
36	210,9	55	0,659
39	197,1	55	0,663
42	183,3	55	0,667
45	169,5	55	0,671
48	155,7	55	0,676
51	141,9	55	0,682
54	128,1	55	0,687
57	114,3	55	0,694
60	100,5	55	0,701
63	86,7	55	0,709
66	72,9	55	0,719
69	59,1	55	0,731
72	45,3	55	0,746
75	31,5	55	0,766
78	17,7	55	0,799
81	3,9	55	0,884
84	-9,9	55	

Fuente. Excel,2023

Una vez calculado el coeficiente de atenuación solo falta conocer el poder emisor del GLP. En kW/m². En la bibliografía consultada solamente se encontró el valor del poder emisor del propano y del metano que oscila alrededor de 173 kW/m²

Tabla 4.20. Cálculo de la radiación

Tiempo [s]	Distancia	HR [%]	Ta	E [kW/m ²]	q [kW/m ²]
3	362,7	55	0,629	173	42,274
6	348,9	55	0,631	173	49,278
9	335,1	55	0,633	173	52,839
12	321,3	55	0,635	173	55,235
15	307,5	55	0,638	173	57,113
18	293,7	55	0,640	173	58,727
21	279,9	55	0,643	173	60,197
24	266,1	55	0,646	173	61,586
27	252,3	55	0,649	173	62,932
30	238,5	55	0,652	173	64,258
33	224,7	55	0,656	173	65,580
36	210,9	55	0,659	173	66,911
39	197,1	55	0,663	173	68,260
42	183,3	55	0,667	173	69,636
45	169,5	55	0,671	173	71,047
48	155,7	55	0,676	173	72,503
51	141,9	55	0,682	173	74,012
54	128,1	55	0,687	173	75,589
57	114,3	55	0,694	173	77,248
60	100,5	55	0,701	173	79,012
63	86,7	55	0,709	173	80,912
66	72,9	55	0,719	173	82,994
69	59,1	55	0,731	173	85,337
72	45,3	55	0,746	173	88,077
75	31,5	55	0,766	173	91,504
78	17,7	55	0,799	173	96,427
81	3,9	55	0,884	173	107,871

Fuente. Excel,2023

Los valores calculados mostrados en la tabla 4.20, son susceptibles de graficarse en función del tiempo.

4.4. MODELO PREDICTIVO CON MACHINE LEARNING ESCENARIO EXPLOSIÓN DE NUBE DE VAPOR

Fue necesario generar una base de datos en función a parámetros termodinámicos del hidrogeno, posteriormente, se inicia la programación en el software Matlab, en específico en el apartado de Machine Learning usando la aplicación Neural Net Fitting. En primer lugar, se trabajó con un algoritmo supervisado lo que quiere decir que durante la programación se incluyen las respuestas esperadas por el usuario del programa, de esa manera el usuario podrá verificar si las respuestas obtenidas mediante el programa son verdaderas. Segundo, la base de datos se construyó con el método TNT equivalente, todos los datos fueron calculados a base de las fórmulas que corresponden a esta técnica.

4.4.1 Determinación de las variables y datos de partida

Una explosión de nube de vapor es uno de los efectos físicos que tiene menor probabilidad de ocurrencia. Ocurrirá siempre y cuando se presenten las condiciones adecuadas de turbulencia y confinamiento. Toda o parte de la nube debe de estar dentro de los límites de inflamabilidad.

Las variables de interés en el análisis de consecuencias de una explosión son:

1. El pico máximo de sobrepresión
2. El impulso de la fase positiva
3. Duración de la fase positiva

Para la predicción de los efectos físicos ocurridos en la gasera por un evento desfavorable se utilizó el modelo “TNT equivalente”. Este método se basa en establecer una relación entre el combustible liberado y la cantidad de trinitrotolueno que provocaría los mismos efectos físicos. Este método permite predecir de forma fácil los daños ocasionados por la explosión de una nube de vapor, haciendo una equivalencia entre la masa de TNT y la cantidad de sustancia explosiva liberada.

La metodología para el cálculo se muestra a continuación:

Se relaciona el poder explosivo de la nube con la cantidad de combustible presente en la nube, independientemente si éste se encuentra dentro de los límites de inflamabilidad. Se hace la suposición que la carga de TNT se encuentra en el centro de la nube. El valor del factor de proporcionalidad se deduce de múltiples incidentes documentados. El método de TNT equivalente, por su origen, tiene varias limitaciones.

En este apartado se hace la simulación de las consecuencias generadas por la explosión de una nube de vapor provocada por la salida de hidrogeno de uno de los tanques de almacenamiento. Se considera el escenario más desfavorable, es decir, el tanque está al 85% de su capacidad y se ha fugado la totalidad del contenido.

Datos de partida:

Volumen del contenido = 28921023 L

Contenido: = hidrogeno comprimido

Calor de combustión del hidrogeno = 131.25 MJ/kg

Calor específico promedio del hidrogeno = 14.304 kJ/kg/K

Calor latente de vaporización del hidrogeno = 451.9 kJ/kg

Temperatura de ebullición del hidrogeno = 20.28 K

Densidad H2= 0.0000899 Kg/L

Temperatura ambiente = 303 K

Determinación de la carga equivalente con la ecuación 4.22:

$$F = 1 - e^{\left(\frac{-C_p \Delta T}{L}\right)}$$

(4.22)

Donde:

F = Fracción flash de la mezcla (Kg)

Cp = Calor específico promedio (KJ/Kg*K)

ΔT = Diferencia de temperatura entre el punto de ebullición y la temperatura del almacén (K)

L = Calor latente de vaporización (kJ/kg)

$$F = 1 - e^{\left(\frac{-14.304 * 282.72}{451.9}\right)} = 0.999 \text{ (kg)}$$

$$W_{H_2} = 0.999 \text{ kg} * 2 * 0.0000899 \frac{\text{Kg}}{\text{l}} * 28921023 \text{ L} = 5199.32 \text{ (kg)}$$

Determinamos el peso equivalente con la ecuación:

$$W_{TNT} = \alpha * W_{H_2} * \frac{\Delta H_{H_2}}{\Delta H_{TNT}}$$

(4.23)

Donde:

W_{H_2} = Masa del explosivo de interés liberada a la atmósfera (kg)

ΔH_{H_2} = Energía de combustión del hidrogeno por unidad de masa (J*kg-1)

ΔH_{TNT} = Energía de onda de choque del TNT por unidad de masa (J*kg-1)

W_{TNT} = Masa de trinitrotolueno que equivale a la cantidad de explosivo de interés que provoca los efectos de la explosión (kg)

α = factor adimensional de rendimiento de la explosión

$$W_{TNT} = 0.03 * 5199.32 * \frac{131.25}{4.68} = 4374.043 \text{ kg} \dots \dots \dots W_{TNT} = 4374.043 \text{ kg}$$

4.4.1.1. Importar librerías y bases de datos

De la planilla Excel se exportan los datos al software Matlab. Los siguientes datos fueron calculados con las ecuaciones anteriormente utilizadas.

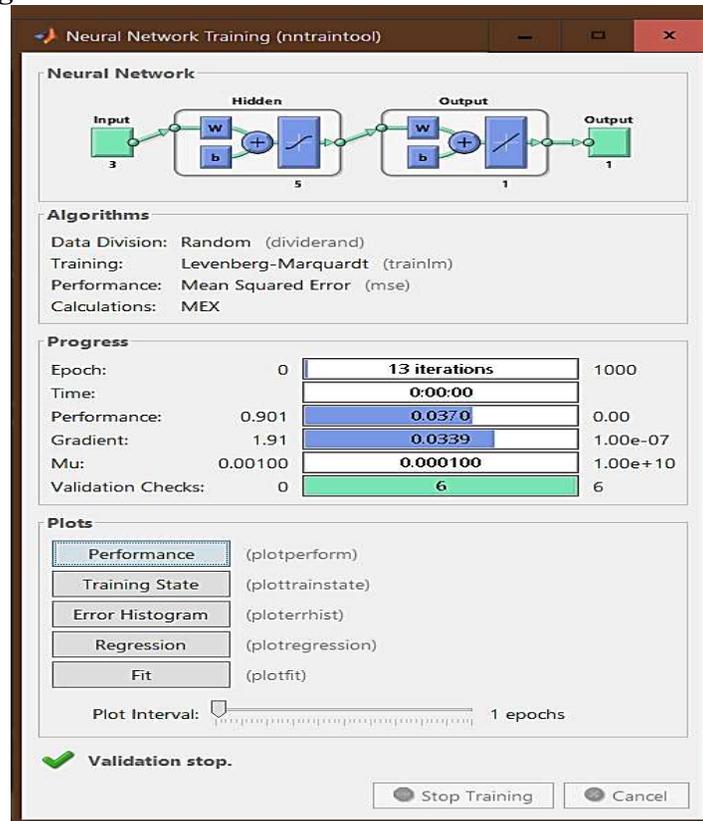
Tabla 4.18. Base de datos para la programación Machine Learning

distancia (m)	d. nominal (m)	Pico de sobrepresión (bar)
1	0,038232004	914,5935079
2	0,076464007	608,2713835
3	0,114696011	426,7049225
4	0,152928015	316,4535486
5	0,191160018	244,0764638
6	0,229392022	193,570989
7	0,267624026	156,7578859
8	0,305856029	129,0615822
9	0,344088033	107,716917
10	0,382320037	90,94926606
20	0,764640073	25,14688119
38	1,45281614	5,985256311
40	1,52928015	5,290545895
50	1,91160018	3,059865924
60	2,29392022	1,938370761
70	2,67624026	1,314238028
80	3,05856029	0,939114707
90	3,44088033	0,69956653
100	3,82320037	0,538911182
200	7,64640074	0,105990741
300	11,4696011	0,044003835
400	15,29280147	0,024095325
500	19,11600184	0,015220629
600	22,9392022	0,010493168
700	26,76240257	0,007674993
800	30,58560294	0,005859045
900	34,4088033	0,004620062
1000	38,23200367	0,003736844
2000	76,46400735	0,000929871
3000	114,696011	0,000412917
4000	152,9280147	0,000232195
5000	191,1600184	0,000148584
6000	229,392022	0,000103175
7000	267,6240257	7,57989E-05
8000	305,8560294	5,80318E-05
9000	344,0880331	4,58513E-05
10000	382,3200367	3,71391E-05

Fuente. Elaboración propia, 2023

En la figura 4.16 se puede observar los resultados de la simulación en el software Matlab. Esta figura es una captura de pantalla donde se observan datos generales del programa realizado.

Figura 4.16. Parámetros del entrenamiento de la red neuronal



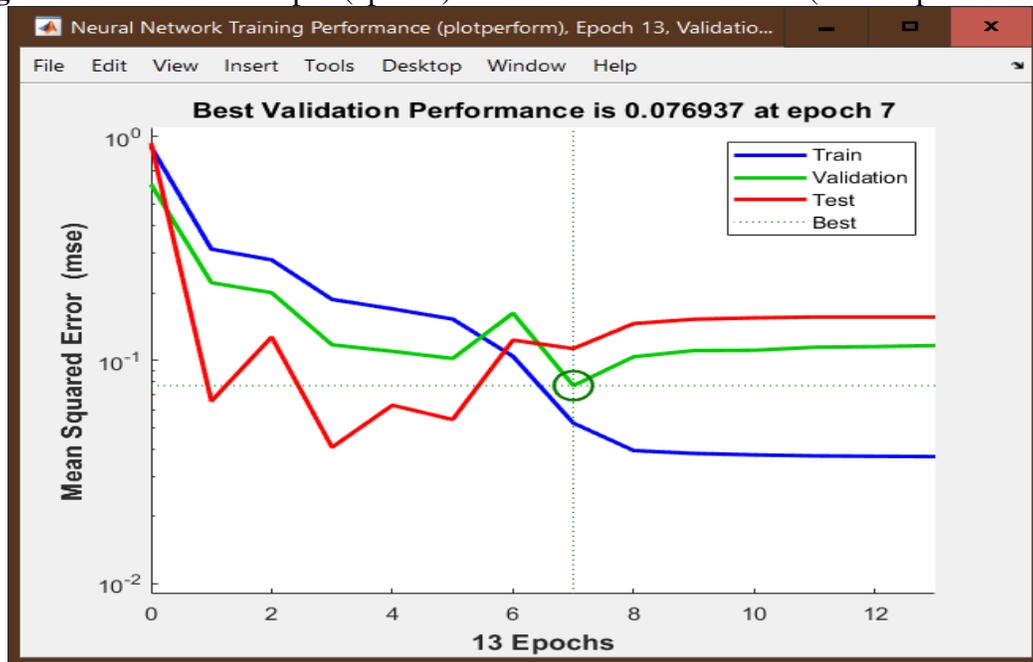
Fuente. Matlab, Machine Learning, 2023

Se obtiene información sobre:

- ✓ El número de iteraciones que se ha realizado en este programa para obtener un algoritmo supervisado de predicción
- ✓ Nivel de rendimiento del programa
- ✓ Las capas ocultas de la red neuronal, se tiene cinco capas ocultas de redes neuronales y una capa de salida.

La figura 4.17 muestra el rendimiento del entrenamiento de la red neuronal, mediante una gráfica, donde se muestra el desarrollo de los errores en el desarrollo de la red, representado por la línea azul, también se muestra la validación de los datos mostrado por la línea verde y finalmente se muestra la el test de los de los datos y de la red neuronal en la línea roja. De la gráfica se concluyó que al final del desarrollo de la red neuronal, los errores fueron bajando.

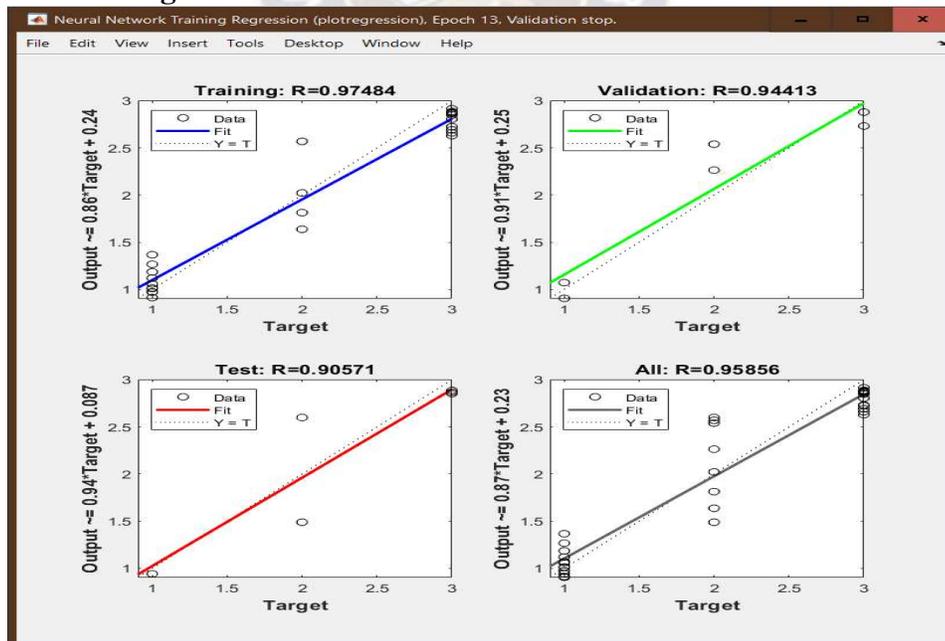
Figura 4.17. Grafica “etapas (epochs) vs. Error cuadrático medio (mean squared error)”



Fuente. Matlab, Machine Learning, 2023

La figura 4.18 muestra la correlación entre las variables. El software Matlab de manera automática realizo la regresión lineal de los datos que son la matriz para el desarrollo del presente programa propuesto. El código de este programa lo encontrara en el Anexo 2.

Figura 4.18. Análisis de correlación entre las variables



Fuente. Matlab, Machine Learning, 2023

4.4.4.2. Implementación y validación del modelo predictivo

El

uso del programa presentado se hace mediante el software Matlab específicamente desde el código de la red neuronal. Previamente el usuario debe instalar el software Matlab versiones de 2018 en adelante.

Para la verificación de las respuestas del programa se debe ingresar a la codificación, e ingresar un dato desconocido o diferente a la base de datos ingresada para su programación. Al ingresar un dato desconocido el programa no funcionará y por el contrario el programa si correrá con datos que estes dentro de los limites dados durante la programación.

Este software realiza la clasificación de riesgos que pueden ser: de riesgo bajo, medio, o alto, en función a la distancia nominal del punto de inicio de la explosión breve de una nube de hidrogeno.

4.5. DISEÑO DE UN PLAN DE MITIGACIÓN DE RIESGOS

4.5.1. DATOS GENERALES:

4.5.1.1. Datos de la organización.

La Planta HVO de diésel renovable es dependiente de la Refinería Guillermo Elder Bell, cuenta con una capacidad de procesamiento de 9000 barriles de diésel verde por día y está conformada por las unidades de Hidrotratamiento, Isomerización y Topping.

4.5.1.2. Introducción.

El presente Plan de prevención de riesgos frente a incendios y explosiones fue realizado para que sea un manual para todo trabajador de la “Planta HVO – Refinería GEB” con el fin de evitar accidentes en su lugar de trabajo, asociado a este documento el trabajador deberá conocer lo estipulado en su contenido y deberá ser instruido acerca de su responsabilidad en el cumplimiento de cada una de las actividades presentadas.

El jefe de Seguridad, es responsable de velar respecto de la aplicación y cumplimiento de este Programa, correspondiendo a todos los niveles de Supervisión y mando, la ejecución de las actividades de seguridad y control de pérdidas tendientes a minimizar la ocurrencia de eventos que pudieren afectar la integridad, salud y autoestima del personal que labora en la planta.

El compromiso personal y la participación activa de cada trabajador de la planta en la ejecución de este plan de prevención, permitirá controlar eficazmente los riesgos inherentes a cada actividad.

4.5.1.3. Objetivos.

Objetivo General

- Establecer, organizar, estructurar e implementar procedimientos para enfrentar una situación de emergencia específicas de incendio y explosiones dentro de la planta HVO y minimizar daños a la salud y a la organización en general.

Objetivos específicos

- Diseñar estrategias para enfrentar incendios y explosiones.

- Minimizar el tiempo de acción mediante una eficiente organización, capacitación y adiestramiento del personal, a fin de que exista una reacción inmediata y favorable.
- Crear brigadas de emergencias de primeros auxilios, de evacuación, de prevención y combate de incendios y brigada de comunicación.

4.5.1.4. Alcance.

Los incendios y explosiones son conocidos como riesgos potenciales en las refinerías y plantas industriales a los que están expuestas personas, es importante recalcar que si se materializan afectarían gravemente a las instalaciones y al personal que trabaja en dicho lugar, puede causar daños de graves consecuencias, pudiendo llegar a ocasionar el efecto domino y afectar a instalaciones vecinas y a la misma ciudad donde están construidas. Por lo tanto, este documento debe estar al alcance de todas las personas involucradas con la planta HVO además que, debe ser entendible para toda persona que requiera utilizarla.

4.5.2. DESCRIPCIÓN DEL CENTRO DE TRABAJO.

4.5.2.1. Descripción general de la planta.

La planta HVO tiene por objeto la transformación de materia prima: aceite vegetal de palma africana y jatropha curcas en combustibles renovables mediante el proceso de hidrogenación para obtener como producto principal el diésel verde o renovable.

La planta HVO está ubicada a 12 kilómetros de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, es dependiente de YPFB Refinación S.A., que desde 2025 aporta al crecimiento regional y nacional.

Cuenta con tres unidades operacionales de destilación: las tres con capacidad de producción de 9000 barriles por día.

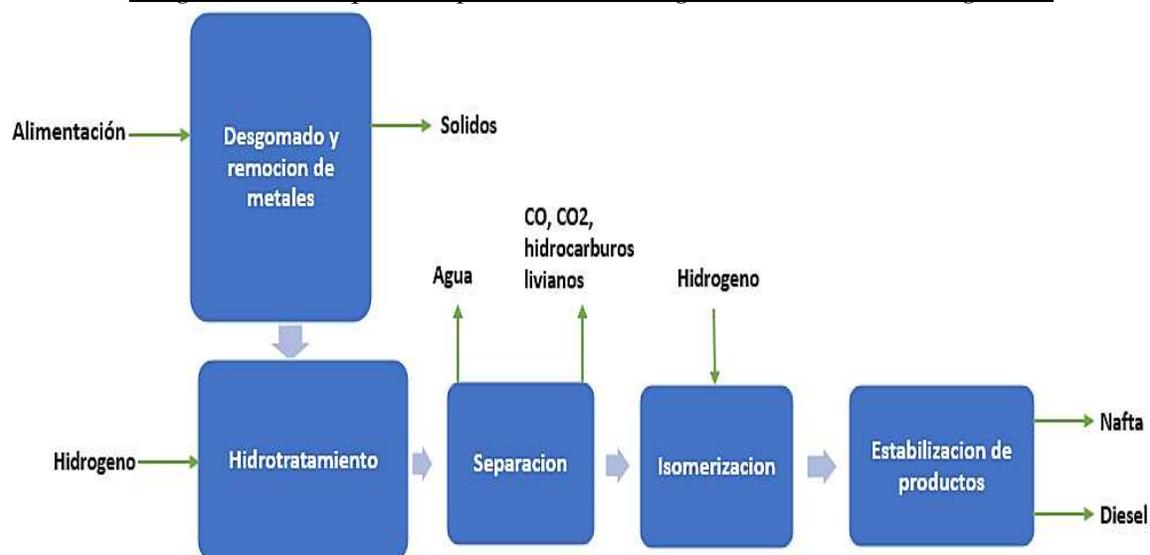
Los principales productos elaborados por la planta son:

- Diesel Oil renovable
- Nafta renovable

La planta HVO está certificada bajo normas ISO 9001:2008 de Calidad; ISO 1401:2004 de Medio Ambiente y OHSAS 18001:2007 de Seguridad, Medio Ambiente y Salud Ocupacional. Cuenta con la acreditación de su laboratorio bajo la norma ISO/IEC: 17025:2005.

YPFB REFINACIÓN S.A. garantiza que sus combustibles renovables pues usarse como aditivos hasta una proporción del 100%.

Diagrama de bloques del proceso de hidrogenación de aceites vegetales



Fuente. Moreno-Hurtado, 2018

4.5.2.2. Descripción de Unidades de Proceso.

La planta cuenta con 3 unidades que son: unidad de hidrotratamiento, unidad de isomerización y cracking y unidad de separación de fluidos. La primera, está compuesta por un reactor de lecho de goteo donde se da lugar la reacción del aceite de palma y el hidrogeno y los productos de su operación son recibidos por el separador trifásico que tiene a la salida se su misma corriente. La segunda, consiste en un segundo reactor de lecho de goteo, lugar donde se realiza la isomerización y rompimiento de las cadenas de alcanos y terminan de reaccionar los remanentes con el hidrogeno. La tercera, consiste en una torre de destilación que sirve para separar los productos finales de acuerdo a su punto de ebullición. La planta está compuesta por 45 equipos en total. Y a continuación se presenta el diagrama de operación y equipos. Ver figura 4.14.

4.5.2.3. Descripción parques de almacenamientos.

Se cuenta con 3 almacenes principales: almacén de aceite vegetal de palma, almacén de hidrogeno comprimido y de productos finales (diésel, nafta y GLP verdes)

4.5.3. NIVEL DE RESPONSABILIDADES

Para el cumplimiento de los objetivos establecidas por el departamento de seguridad, es fundamental el compromiso de cada uno de los niveles directivos y trabajadores. Por ello, se determinarán las responsabilidades que debe cumplir cada nivel de la organización.

4.5.3.1. Nivel directivo superior

4.5.3.1.1. Orden de actuación

La figura 4.19 muestra el orden de actuación ante una emergencia.

Figura 4.19. Orden de actuación



Fuente. Elaboración propia, 2023

Jefe del departamento de seguridad

- Elaborar la Política de Protección y Administración de los Recursos de la planta y comunicarla a la línea de mando.
- Definir las metas de los umbrales de riesgo para cada etapa del proceso.
- Ejercer el Liderazgo Directivo para el cumplimiento de las metas estipuladas por el departamento de Seguridad en Plan de Prevención de Riesgos.

Ingeniero coordinador

- ✓ Ejercer continuo liderazgo para dar cumplimiento a las metas estipuladas por el jefe del departamento de seguridad en el Plan de Prevención de Riesgos en la obra a ejecutar.
- ✓ Difundir activamente y dar cumplimiento continuo a la Política de Prevención de Riesgos.
- ✓ Asignar los recursos que sean necesarios para el cumplimiento de la Prevención de Riesgos.
- ✓ Ejecutar el Programa de auditorías internas sobre el Plan de Prevención de Riesgos de la obra, ejerciendo control y mejoramiento de las desviaciones detectadas.
- ✓ Promover el comportamiento seguro de los trabajadores en general por medio de campañas motivacionales dirigidas a todos los niveles operativos de la empresa en la obra.
- ✓ Mantener una conducta intachable en materia de prevención de riesgos y dar ejemplo a seguir al personal de la planta.
- ✓ Diseñar planes de contingencias que permitan controlar y optimizar los indicadores de gestión de Prevención de Riesgos de la empresa en la obra.

4.5.3.2. Nivel supervisión superior

Jefe de Área

- ✓ Reforzar el comportamiento seguro de los trabajadores en general por medio de contactos motivacionales dirigidos a todos los niveles operativos en la planta.
- ✓ Ejecutar y responsabilizarse en el cumplimiento personal de las actividades que demanda el Plan de Prevención de Riesgos.
- ✓ Elaborar el inventario de ítems críticos de acuerdo a las actividades a desarrollar y definir los estándares de desempeño para todos los niveles operativos.
- ✓ Construir y ejecutar con sus superiores y el prevencionista el programa de auditorías internas sobre el cumplimiento del plan de prevención de riesgos de la obra, proponiendo medidas de control y mejoramiento de las desviaciones detectadas.
- ✓ Comunicar en forma inmediata a sus superiores el acontecimiento de incidentes.
- ✓ Definir con sus superiores, el plan de acciones correctivas a seguir, controlando su estricto cumplimiento por medio de seguimiento personalizado.

4.5.3.3. Nivel supervisión operativa

Supervisores

- ✓ Conocer y difundir activamente la política de prevención de riesgos de la empresa y dar cumplimiento continuo a su contenido.
- ✓ Instruir permanentemente al personal bajo su mando en los riesgos inherentes a los trabajos a ejecutar, dejando registro escrito y firmado por los asistentes en los formatos estipulados para ello.
- ✓ Reforzar activamente el comportamiento seguro de los trabajadores en general.
- ✓ Ejecutar y responsabilizarse en el cumplimiento personal de las actividades que demanda el plan de prevención de riesgos.
- ✓ Dar cumplimiento a los estándares de desempeño definidos por el inventario de ítems críticos para todos los niveles operativos de la planta.
- ✓ Dar estricto cumplimiento al plan de acciones correctivas a seguir, controlando su cumplimiento por medio de seguimiento personalizado.
- ✓ Exigir en todo momento, el uso permanente de los elementos de protección personal a todos los trabajadores de la planta.

- ✓ Inspeccionar permanentemente, todas las áreas de trabajo bajo su responsabilidad con el objeto de detectar condiciones de riesgo en la ejecución de las actividades y dar instrucción inmediata de corrección, orientando a los trabajadores acerca de la forma segura de desarrollarlas.
- ✓ Asistir a cursos de capacitación de seguridad según lo estipulado en el plan de capacitación de la empresa.

Trabajadores

- ✓ Hacer buen uso del equipo de protección personal que le suministra gratuitamente la empresa.
- ✓ Informar personalmente y en forma inmediata a su Supervisor, cualquier incidente que sufra por leve que sea y entregar toda la información sobre el incidente.
- ✓ Informar a su Supervisor sobre condiciones inseguras detectadas en su área de trabajo.
- ✓ Acatar las instrucciones de seguridad impartidas por cualquier supervisor de su área que en su contexto general pretendan cuidar la integridad del trabajador.
- ✓ Plantear sugerencias positivas para el control de los riesgos operacionales.
- ✓ Asistir diariamente a charlas de seguridad impartidas por el supervisor responsable y participar activamente en el desarrollo de su contenido.
- ✓ Mantener un comportamiento seguro en todas las actividades a desarrollar, motivar a los compañeros de trabajo frente al desempeño laboral con seguridad.
- ✓ Inspeccionar permanentemente las áreas de trabajo bajo su responsabilidad con el objeto de detectar condiciones de riesgo en la ejecución de las actividades, corregir las condiciones buscando siempre la forma segura de desarrollarlas.
- ✓ Ejecutar y responsabilizarse en el cumplimiento personal de las actividades que le demanda el plan de prevención de riesgos.
- ✓ Solicitar en todo momento el apoyo del departamento de prevención de riesgos de la planta frente al desarrollo de actividades de alto riesgo.
- ✓ Mantener una conducta intachable en materia de Prevención de Riesgos siendo el ejemplo a seguir para todos los compañeros de trabajo.

4.5.4. PROGRAMA DE PREVENCIÓN DE RIESGOS.

4.5.4.1 Política de Prevención de Riesgos.

La Planta HVO tiene una Política de Prevención de Riesgos en la cual establece los compromisos y principios de la empresa. La política firmada por el gerente y aprobada se instalará en la sala de reuniones, recepción y oficinas de la administración.

Además, esta será dada a conocer al personal en la Inducción de trabajadores nuevos y publicado en lugares visibles de la planta.

4.5.4.2. Identificación y evaluación de riesgos

4.5.4.2.1. Inventarios Críticos

Antes del inicio de los trabajos se deberá realizar el inventario de riesgos críticos de la obra con el objeto de cubrir todos los eventos del proceso. Tomar como guía el diagrama P&ID para analizar parte por parte el proceso.

4.5.4.2.2. Inspecciones

El departamento de seguridad, realizara inspecciones programadas o no programadas de acuerdo a la periodicidad indicada en los programas personalizados.

4.5.4.2.3. Código de Colores

Sistema de Control mediante el cual todos los meses debe etiquetarse con un color predeterminado toda herramienta o equipo entregado en buen estado, el control del etiquetado está bajo la responsabilidad del jefe de Almacén y Mantenimiento y Servicios.

4.5.4.2.4. Bloqueo de Equipos y Maquinarias

Ningún equipo, maquinaria o medio de distribución con energía acumulada, sea esta eléctrica, neumática, hidráulica, térmica o potencial gravitatorio puede ser intervenido si antes no se ha procedido a su bloqueo mediante candado, cadena, barra u otro artificio que impida su accionar y además tenga tarjeta de identificación del bloqueo. Todo bloqueo se realizará teniendo como referencia el procedimiento divisional de bloqueo de equipos.

4.5.4.2.5. Equipos de protección personal

- **Adquisiciones**

Todo equipo de protección personal a usar en obra será debidamente certificado por un organismo competente. El encargado de las adquisiciones será responsable por la oportuna llegada a obra de la respectiva certificación.

- **Control de Uso y Cuidado**

La responsabilidad del uso y cuidado es individual, pero se re instruirá permanentemente a los trabajadores mediante charlas sobre la conveniencia del uso en buen estado de los elementos.

- **Inspecciones**

Los supervisores realizarán inspecciones quincenales a sus trabajadores, sin perjuicio de las inspecciones realizadas por cualquier supervisor.

4.5.4.2.6. Salud ocupacional

Examen Pre ocupacional

Durante al proceso de contratación el postulante debe realizarse un examen físico. Si en tal examen aparecen alteraciones, se definirá en faena si se solicitan exámenes a especialistas o se rechaza el ingreso.

Examen Psico Técnico

Previo al inicio de los trabajos, los operadores de equipos críticos y los choferes de transporte de personal, deben realizarse un examen por un organismo competente que avale sus habilidades operacionales.

Alcohol y Drogas

Estos problemas se fiscalizarán con la observación permanente por parte de los supervisores, dando constancia a Prevención de Riesgos de las sospechas para realizar vigilancia u observación más intensivos o derivar a médicos los casos que se sospeche de consumos. En estos casos el trabajador será retirado, para que siga un tratamiento de rehabilitación. Además, se realizarán charlas y actividades tendientes a informar los riesgos.

4.5.4.3. Identificación de disposiciones Legales

a) Leyes, Decretos, Normas, Reglamentos y Disposiciones

Se aplicarán en faenas todas aquellas leyes, decretos o normativas, que tienen relación con el trabajo a desarrollar, sean nacionales o divisionales. La norma que regirá al presente plan de mitigación es la Ley General De Higiene, Seguridad Ocupacional Y Bienestar.

Identificado los requisitos legales y normas divisional, estas se difundirán a todo el personal y se controlará su cumplimiento.

b) Reglamento Interno de Orden y Seguridad

Al ingresar a la faena y antes del curso de inducción al trabajador nuevo se le hará entrega de este documento, quedando archivado el registro de recepción.

4.5.4.4 Programa de Seguridad y Salud Ocupacional

Para el cumplimiento de los objetivos establecidos en el Plan de Prevención de Riegos, la planta HVO, tiene un Programa de Seguridad y Salud Ocupacional Personalizado de actividades a desarrollar durante la ejecución de los trabajos.

Funciones de la División de Salud, Higiene y Seguridad

Las funciones y actividades de la División de Salud, Higiene y Seguridad en el Trabajo son:

- Adiestrar y ejercitar a los miembros de la brigada en combate contra incendios.
- Seleccionar a los miembros de la brigada.
- Organizar a la brigada en diferentes grupos.
- Establecer reglamentaciones, normas.
- Hacer inspecciones para asegurarse que se están cumpliendo las precauciones contra incendio.
- Verificar los equipos de lucha contra incendio: mangueras y extintores.
- Investigar los incendios o focos de incendios y elevar los informes correspondientes con sus recomendaciones.
- Implementar, colocar y mantener en buen estado la señalización.
- Contar con un censo actualizado y permanente del personal.
- Vigilar el mantenimiento del equipo contra incendio.
- Vigilar que el equipo contra incendio sea de fácil localización y no se encuentre obstruido.
- Emitir después de cada simulacro reporte de los resultados de la evaluación.

4.5.4.5. Programa de Entrenamiento y Capacitación

a) Curso Básico de Prevención Los trabajadores antes de ingresar o durante a la faena deben tener su credencial de aprobación de este curso, los cursos se impartirán según necesidades de contratación y disponibilidad de cupos del organismo administrador del curso.

b) Inducción de Trabajadores Nuevos

Todos los trabajadores antes de ingresar a realizar trabajos recibirán una charla de una duración mínima de 4 horas cronológicas impartida en la sala de capacitación.

4.5.4.5.1. Inducción de Supervisión

Todo supervisor que ingrese por primera vez a planta y antes de iniciar cualquier trabajo, debe asistir a un curso de orientación con una duración de 4 horas.

c) Charlas Específicas del Supervisor

Una vez a la semana el supervisor reunirá a su personal para entregar esta charla con una duración mínima de 15 minutos y cada vez que se implante un nuevo procedimiento de trabajo. *El Ingeniero coordinador, como parte de sus actividades personalizadas, dará charlas integrales una vez a la semana.*

d) Charla Diaria del supervisor de área

Diariamente antes de iniciar las actividades el capataz entregara una charla de 5 minutos a su cuadrilla enfocada a las actividades a realizar y los riesgos que presenta y como controlarlos.

e) Re instrucción de Accidentados

Aquellos trabajadores que hubiesen sufrido un accidente por leve que fuese, o incidentes potencialmente graves, antes de volver al trabajo recibirá una re instrucción por parte del encargado del departamento de Prevención de Riesgos.

4.5.4.6. Procedimientos de Control Operacional

a) Procedimientos de Trabajo

Se elaborarán procedimientos de trabajo de acuerdo a lo establecido en el inventario de riesgos críticos, los cuales deben estar aprobados antes de iniciar las actividades. Estos procedimientos serán difundidos para que sean conocidos por los trabajadores y supervisión relacionada con cada tarea.

b) Análisis de Trabajo Seguro (AST)

Para las actividades críticas se realizarán los ATS (Análisis de Trabajo Seguro) necesarios para la correcta ejecución y control de la actividad y estos complementarán los procedimientos generales. Sistema de Permisos de Trabajo (PTW)

4.5.4.7. Planes de contingencia y procedimientos de emergencia

Se presenta los procedimientos de emergencias para enfrentar situaciones específicas de incendios y explosiones debido a que estas pueden alterar la continuidad del funcionamiento de la planta.

A. Brigadas de Incendio

Las Brigadas estarán conformadas por personal propio de YPFB, recibiendo capacitación teórica y práctica en Prevención y Extinción de Incendios como también en la aplicación de primeros auxilios.

La Brigada de Prevención y Combate de Incendio tiene las siguientes funciones y actividades:

- I. Intervenir con los medios disponibles para tratar de evitar que se produzcan daños y pérdidas en las instalaciones como consecuencia de una amenaza de incendio.
- II. Conocer el uso de los equipos de extinción de fuego, de acuerdo a cada tipo de fuego.

Funciones del Personal de Brigada.

Aunque cada Brigada de Emergencia tiene funciones específicas, en general serán las siguientes:

1. Estar informados del riesgo de incendio en las distintas dependencias.
2. Señalar las anomalías que detecten y verificar que sean subsanadas.
3. Conocer la existencia y operación de los medios materiales disponibles.

4. Estar capacitado para suprimir, sin demora, las causas que puedan provocar cualquier anomalía, mediante:
 - ✓ Una acción indirecta, transmitiendo la alarma a las personas designadas en el Plan de Emergencia.
 - ✓ Una acción directa y rápida (corte de la electricidad, cierre de válvulas de paso de gas u otro fluido, aislamiento de materiales inflamables, cierre de puertas y ventanas,
5. Combatir el fuego desde que se descubre, mediante:
 - ✓ El accionamiento de alarmas.
 - ✓ La aplicación de las consignas del Plan de Emergencia.
 - ✓ La utilización de los medios de primera intervención disponibles mientras llegan los refuerzos.
6. Prestar los primeros auxilios.
7. Coordinar las acciones con los miembros de otros equipos.

Una vez detectado un incendio, el personal miembro de la Brigada de Incendio que se encuentre en el área, se dirigirá al lugar donde evaluarán la situación, si fuera necesario combatirán el incendio sin exponer su integridad física, si se identifica una situación crítica será reportado al jefe de Brigada quien declarará tal situación.

SITUACIÓN CRÍTICA: Esta dada por el requerimiento para la extinción, si se deberá emplear más de un extintor o que por la presencia de gran cantidad de humo no se puede determinar.

B. Brigada de Evacuación

Función del coordinador de la brigada de evacuación: éste determina el momento adecuado para ordenar la evacuación de la empresa, de acuerdo a los criterios de decisión consignados en el plan.

El personal de esta Brigada es el encargado de coordinar la evacuación, realizando acciones encaminadas a asegurar una evacuación total y ordenada.

Las funciones y actividades de las Brigadas de Evacuación son:

1. Dar la señal de evacuación de las instalaciones, conforme las instrucciones del jefe de Emergencias.
2. Participar tanto en los ejercicios de desalojo, como en situaciones reales.

3. Ser guías y retaguardias en ejercicios de desalojo y eventos reales, llevando a los grupos de personas hacia las zonas de menor riesgo y revisando que nadie se quede en su área de competencia.
4. Determinar los puntos de reunión.
5. Conducir a las personas durante un alto riesgo, emergencia, siniestro o desastre hasta un lugar seguro a través de rutas libres de peligro.
6. Verificar de manera constante y permanente que las rutas de evacuación estén libres de obstáculos.
7. En caso de que una situación amerite la evacuación del inmueble y la ruta de evacuación determinada previamente se encuentre obstruida o represente algún peligro, indicar al personal las rutas alternas de evacuación.
8. Realizar un censo de las personas al llegar a los puntos de reunión.
9. Coordinar el regreso del personal a las instalaciones en caso de simulacro o en caso de una situación diferente a la normal, cuando ya no exista peligro.
10. Coordinar las acciones de repliegue, cuando sea necesario.

C. Brigada de Primeros Auxilios

El personal de la brigada de primeros auxilios es aquel que ha sido entrenado y capacitado para prestar asistencia de primeros auxilios a los lesionados durante una emergencia, esta asistencia será dada hasta que llegue la asistencia médica profesional.

Las funciones y actividades de las Brigada de Primeros Auxilios son:

- Reunir a la brigada en un punto predeterminado en caso de emergencia, e instalar el puesto de socorro necesario para atender el alto riesgo, emergencia, siniestro o desastre.
- Proporcionar los cuidados inmediatos y temporales a las víctimas de un alto riesgo, emergencia, siniestro o desastre a fin de mantenerlas con vida y evitarles un daño mayor, en tanto se recibe la ayuda médica especializada.
- Entregar al lesionado a los cuerpos de auxilio profesionales.
- Realizar, una vez controlada la emergencia, el inventario de los equipos que requerirán mantenimiento y de los medicamentos utilizados. Así como reponer estos últimos.
- Mantener actualizado, vigente y en buen estado los botiquines y medicamentos.

D. Brigada de Comunicación

Las funciones y actividades de la Brigada de Comunicación son:

- Contar con un listado de números telefónicos de los cuerpos de auxilio en la zona.
- Hacer las llamadas a los cuerpos de auxilio, según el alto riesgo, emergencia, siniestro o desastre que se presente.
- En coordinación con la Brigada de Primeros Auxilios tomará nota del número de ambulancia, nombre del responsable, dependencia y el lugar donde será remitido el paciente.
- Recibir la información de cada brigada, de acuerdo al alto riesgo, emergencia, siniestro o desastre que se presente, para informarles al jefe de Emergencia y cuerpos de emergencia.
- Permanecer en el puesto de comunicación e instalarse allí hasta el último momento, o bien, si cuenta con aparatos de comunicación portátiles, lo instalará en el punto de reunión.

Todo el personal de la planta, habiendo recibido capacitación en Prevención y Extinción de incendio como también en Primeros Auxilios, cualquiera de ser necesario, puede participar en apoyo a la Brigada de Comunicación siendo autorizado por el encargado.

4.5.4.7.1. Planes de contingencia

A. Plan de contingencia en caso de lluvias intensas, inundaciones y vientos fuertes

Se pueden presentar accidentes y peligros causados por condiciones naturales, como inundaciones, lluvias intensas (fuerte aguacero), derrumbes etc. En caso se produzca fugas o derrames como consecuencias de inundaciones, se implementará la respuesta mencionada en los puntos se implementará el plan de emergencias para fugas y derrames.

1. Cuando se inicien lluvias intensas, inundaciones o vientos fuertes el personal dejará de operar de inmediato y, de ser necesario, se apagarán las máquinas o equipos que están siendo utilizadas y se dirigirá en primera instancia a los puntos de concentración o reunión preestablecidos.
2. Así mismo comunicar el evento a las autoridades locales. Si hay víctimas, se deben prestar los primeros auxilios, comunicarse con el número de emergencias y posteriormente realizar investigación del accidente. Colaborar con posibles rescates y coordinar traslados hacia centros hospitalarios.
3. Verificar posibles daños eléctricos o de otro tipo.
4. Garantizar la estabilidad de objetos que puedan haber quedado inestables durante la tormenta.
5. Informar a las empresas de servicios si se presenta caída de cables o árboles.
6. Evalúe los daños y defina el plan de recuperación.

Recomendaciones para las personas presentes ante una lluvia intensa:

- No toque equipos eléctricos o teléfonos, porque la caída de rayos puede conducir su descarga a través de los cables.

- Observe que los equipos, maquinas o herramientas tengan polo a tierra.
- Baje los tacos, breakers y cortacircuitos.
- Tenga cuidado con cables de alta tensión que puedan desprenderse por la tormenta.
- Resguárdese lejos de las estructuras metálicas.
- Protéjase en un sitio preferiblemente cerrado o libre de elementos que puedan caer.
- Informar al brigadista a cargo. Esté atento a las instrucciones al grupo de atención de emergencias.

Recomendaciones frente una inundación:

- Revise las obstrucciones sobre los pozos, sumideros y demás estructuras que impidan el desagüe de las aguas lluvias, así como el aumento de nivel en las alcantarillas.
- No arroje basuras o desechos en suelos de pendiente. Estos pueden hacer que el agua se filtre y se desestabilice el terreno.
- Verifique que las conexiones para la conducción de aguas no presenten fugas.
- Suspnda el trabajo que esté ejecutando.
- Baje los tacos de la luz, cierre las llaves de paso de agua y de gas.
- Evacúe ante la señal de alarma o cuando los brigadistas o encargados se lo indiquen.

B. Plan de contingencia en caso de sismos

La probabilidad de ocurrencia de este evento adverso significa un riesgo para la vida y la integridad de las personas, su patrimonio y el medio ambiente; además generaría la interrupción de los servicios públicos esenciales y de las actividades normales de la población.

- ✓ Si se hace frente a una situación de sismo o terremoto, el personal deberá ser instruido a mantener la calma en todo momento. Pensar con claridad es lo más importante en esos momentos.
- ✓ Cuando comiencen los temblores el personal dejará de operar de inmediato, apagando rápidamente las máquinas o equipos que están siendo utilizadas y se dirigirá en primera instancia a los puntos de concentración o reunión preestablecidos.
- ✓ En caso de no lograrse tal cometido, se desplazarán para protegerse en áreas seguras (marcos de puertas, debajo de mesas o escritorios fuertes si se está dentro de oficinas, de no existir muebles con esas características, deberán desplazarse hacia una esquina del ambiente o pasillo; son válidas también aquellas zonas abiertas, libres de cables eléctricos o escombros, etc.).

- ✓ En el interior de las instalaciones colocarse en cuclillas o sentado, agarrado del mueble, cubriéndose la cabeza y el rostro. Protegerse de los objetos que puedan caer.
- ✓ Luego del primer temblor las personas deberán estar preparadas para recibir más sacudidas debido a las ondas de choque que siguen al primero. La intensidad puede ser moderada, pero aun así causará daños.
- ✓ La Brigada de emergencia, verificarán la existencia de heridos. No se moverán las personas con heridas graves a menos que estén en peligro. Se realizarán los primeros auxilios y se dará atención a las reacciones emocionales consecuencia del hecho.
- ✓ Si las condiciones lo requieren, se solicitará asistencia a los Bomberos, Policía, en aquellos lugares próximos a centros urbanos.
- ✓ Se verificará si hay escapes de gas, de detectarse pérdidas se procederá a cerrar las llaves de paso correspondientes, de igual de forma se hará con los servicios de agua y electricidad.
- ✓ Se tendrá precaución con la posible existencia de cristales rotos, evitándose el contacto con cables eléctricos derribados e instalaciones dañadas.
- ✓ No se generará chispas y llama en las áreas afectadas por el terremoto.
- ✓ En caso de producirse incendios como consecuencias del temblor, se implementará el plan de emergencias contra incendios. Se limpiarán posibles derrames de líquidos combustibles, inflamables, tóxicos, medicamentos, etc.
- ✓ Se inspeccionarán con precaución los mobiliarios, estando atentos a objetos que puedan caer súbitamente de los estantes.

C. Plan de Contingencia en caso de Incendio y/o Explosión

- ✓ No sobrecargar los circuitos eléctricos. Sea cuidadoso en el manejo de equipos eléctricos; informe sobre las instalaciones eléctricas defectuosas o deterioradas.
- ✓ Almacene los materiales inflamables en recipientes aprobados y cerrados, manteniéndolos alejados de fuentes de ignición o calor.
- ✓ Limpiar inmediatamente los derrames de productos inflamables.
- ✓ Cerciorarse de que todos los empleados conozcan la ubicación y operación de la parada de emergencia y del interruptor general de corriente.
- ✓ Asegurarse de que nadie fume en las áreas en que haya vapores de combustible. Verificar que nadie use celulares o equipos similares.

- ✓ Señalización clara de las áreas de trabajo que permita captar el mensaje y adoptarlo.
- ✓ Capacitar y entrenar al comité de emergencia y a las brigadas de emergencia en técnicas de primeros auxilios. Y realizar simulacros de incendio periódicamente, mínimo una vez al año.
- ✓ Interrumpir inmediatamente suministro eléctrico a equipos y maquinaria.
- ✓ Reporte novedades a los brigadistas, encargados o cuerpos de emergencia.
- ✓ Si no es posible apagar o controlar el fuego evacue la zona. En caso de evacuación no debe devolverse por ningún motivo y debe cerrar sin seguro cada puerta que pase poder aislar las llamas.
- ✓ Si está capacitado, tomar el medio de extinción apropiado y controlar el fuego; en caso contrario, aléjese del área y espere la llegada de los grupos de apoyo y siga las instrucciones.
- ✓ Evite el pánico, no corra ni cause confusión.
- ✓ Si el humo le impide ver, desplácese a gatas cubriéndose la nariz y la boca con un paño húmedo.
- ✓ Si su ropa se incendia no corra, arrójese al suelo y dé vueltas sobre su cuerpo (auto apagado).
- ✓ Si en su ruta de evacuación se encuentra una puerta, tóquela, si está caliente no la abra, busque otra salida.
- ✓ Reúnase con sus compañeros en el punto de encuentro
- ✓ Si hay víctimas, se deben prestar los primeros auxilios, comunicarse con el número de emergencias, colaborar con posibles rescates y coordinar traslados hacia centros hospitalarios.
- ✓ Si existen víctimas y usted no tiene entrenamiento en primeros auxilios, acompañe a la víctima mientras llega el grupo de apoyo.
- ✓ En caso de requerirse evaluación médica, deberá dirigirse al centro de salud más cercano y esperar indicaciones.
- ✓ Como medida de prevención mantenga los teléfonos de emergencia con usted, porte los documentos de seguridad social y permanezca con su equipo de trabajo.
- ✓ Evalúe los daños. Sí hubo lesionados se debe realizar investigación del accidente. Realizar la investigación del accidente o incidente presentado y tomar los correctivos necesarios. Defina el plan de recuperación.

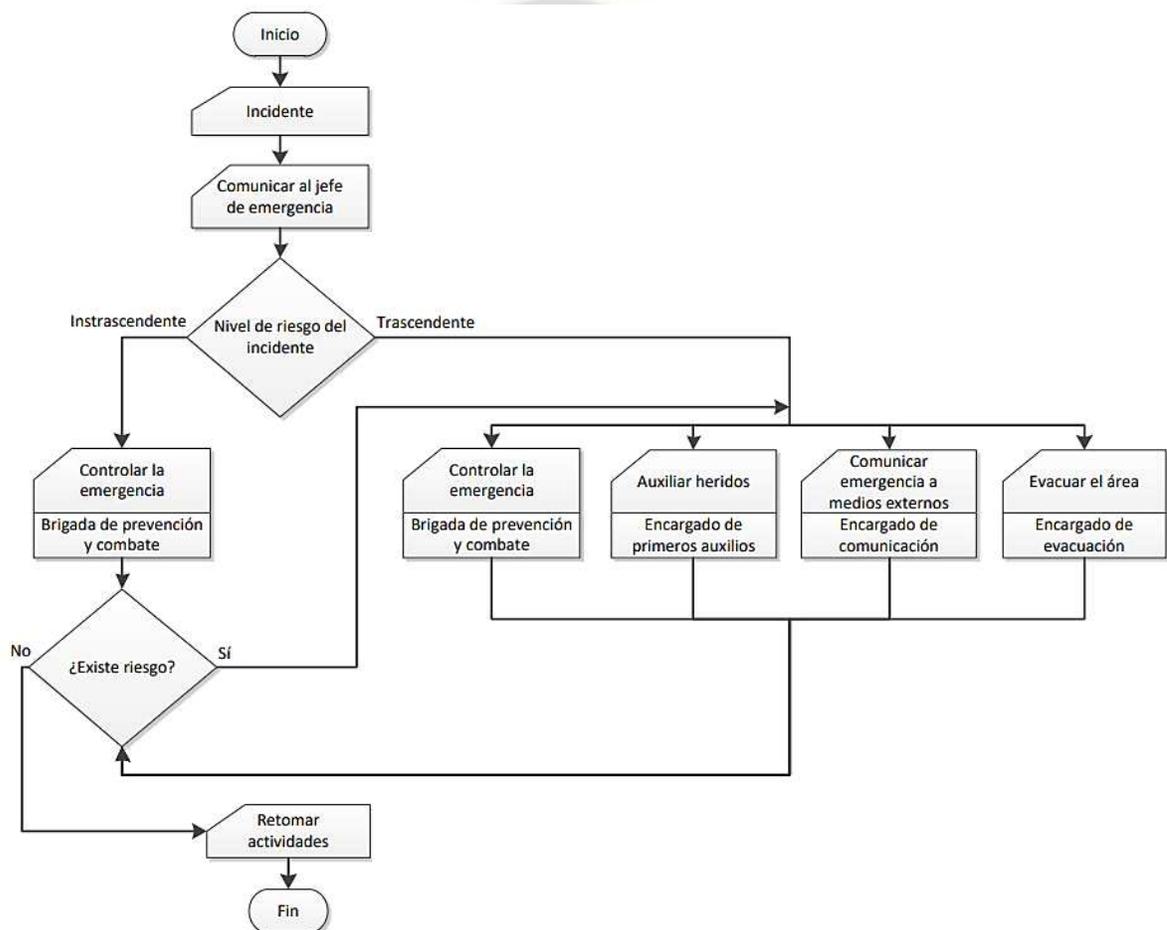
4.5.4.7.2. Procedimientos de emergencia

Procedimientos de control de incendios.

La persona designada como coordinador de este tipo de emergencias es el “coordinador de brigada”. El flujograma que se muestra a continuación detalla los pasos que se deben seguir ante la presencia de fuego.

Función coordinador de la brigada

- Determina acciones específicas de ataque contra incendios



Fuente. De Gracia Storch- García (2008)

Este procedimiento será llevado a cabo por los miembros de la brigada de prevención y combate de incendio que se encuentre próximo al lugar de la emergencia.

Consiste básicamente en controlar el fuego utilizando los medios como extintores de polvo químico, extintores de CO_2 , o los hidrantes de incendio.

El control de emergencia se debe realizar siempre y cuando no se ponga en riesgo la integridad física de la o las persona que la estén realizando ni de ninguna otra persona que se encuentre en el lugar; caso contrario hay que dejar el trabajo a los equipos externos (bomberos).

Procedimiento de Auxilio a los heridos.

La persona designada como coordinador y líder de este tipo de procedimientos es el “encargado de primeros auxilios”. Esta tarea será encomendada a los miembros de la Brigada de Primeros Auxilios, esta asistencia será dada hasta que lleguen los medios externos para prestarles servicio médico profesional. En caso de que no haya personal entrenado en primeros auxilios en el lugar de la emergencia, se aguardará la llegada de los medios externos de primeros auxilios.

Procedimiento de Comunicación de la Emergencia a los Medios Externos.

La persona designada como coordinador y líder de este tipo de procedimientos es el “encargado comunicación”. El procedimiento de comunicación de la Emergencia a los Medios Externos estará a cargo de la Brigada de Comunicación, la cual se encargará de comunicar a los equipos externos de auxilio tales como: el cuerpo de bomberos, ambulancias, policías, clínicas, etc. Los brigadistas deberán realizar la comunicación externa previa autorización del Encargado de Área.

Procedimiento de Evacuación del Personal.

El procedimiento de Evacuación del Personal estará a cargo de la Brigada de Evacuación. El personal que observe una situación anómala en el área donde desarrolla sus tareas, deberá dar aviso en forma urgente al encargado del área o al jefe de cualquier brigada.

Seguidamente, identificada una situación crítica se procederá a accionar la alarma y a evacuar el área afectada, respetando las normas establecidas:

- Seguir las instrucciones de la Brigada de Evacuación.
- No perder tiempo recogiendo objetos personales, muchas personas perecen en un incendio porque ignoran que el fuego se incrementa en muy poco tiempo.
- Si se encuentra atrapado en un recinto:
 - Confínese, coloque trapos debajo de la puerta para evitar el ingreso de humo.
 - Si está lleno de humo quédese en el suelo donde el aire es más respirable.
 - Buscar una ventana, señalizando con una tela o papel para poder ser localizado desde el exterior.
 - Comunicar su ubicación por teléfono o radio, si es posible al número de emergencia.

- Abra las ventanas y colóquese debajo de ellas.

- No salte afuera. Eso ha costado la vida a muchas personas que de haber esperado unos minutos más hubieran sido rescatadas.

- Caminar hacia la salida asignada por la ruta de evacuación.
- No correr, caminar rápido cerrando puertas y ventanas.
- Las evacuaciones de personas enfermas, lesionadas, discapacitadas o mujeres embarazadas serán realizadas por los encargados de área, personal asignado y/o voluntarios.
- Evitar el pánico.
- No transportar bultos.
- Si tiene que abrir una puerta tentarla con la mano, si está caliente, no hay que abrirla, puede haber fuego del otro lado.
- Bajar las escaleras caminando, sin hablar, gritar o correr, respirando por la nariz.
- Si al bajar se encuentra con humo respire por la nariz y salga del lugar gateando.
- El humo y los gases tóxicos suelen ser más peligrosos que el fuego, si es posible cubrir las vías respiratorias con un pañuelo o algo que filtre los residuos.
- Si hay pánico cerca de la salida principal no se acerque al tumulto.
- Una vez evacuado se dirigirá en orden hacia el punto de reunión preestablecido.
- No regresar al sector siniestrado.
- Dar información necesaria al personal de bomberos.

➤ **Procedimiento en caso de fuga de gas de ducto o compresora / pérdida de presión en la línea**

En planta, retirar las fuentes inmediatas de ignición, ejemplo: prohibir fumar. Las concentraciones atmosféricas deberán ser monitoreadas en forma regular. Recordar que el periodo correcto de ventilación puede variar de unos minutos a períodos mucho más largos, como varias horas. Las mezclas con altas concentraciones de gas son un peligro potencial cuando comienzan a disminuir las concentraciones de gas. Se podrá decidir sobre la posibilidad de realizar el trabajo a toda presión, a presión reducida o con la necesidad de aislación. En estos casos, el Grupo de Operaciones en Terreno considerará lo siguiente:

- La aparente gravedad de la fuga de gas.
- El área afectada por la fuga de gas.
- La presión de gas en el ducto.
- Efectos en el suministro.

- La proximidad de edificios.
- Las fuentes y consecuencias de ignición.
- Se deberá verificar la presencia de gas en el aire y localmente en el suelo.

Si la fuga está dentro de la planta de compresión, notificar al Centro de Supervisión y Control de inmediato. Si la fuga es reparable, tomar las medidas para controlar y eliminar la fuga. Si es fuera de control, evacuar la instalación con rapidez.

Dentro del Centro de Supervisión y Control, verificar inmediatamente las presiones de gas que entran y salen del sistema para confirmar el escape de gas. Si se confirma y es necesario, proceder con el cierre del sistema, de acuerdo a los procedimientos establecidos, reduciendo la presión a un valor apropiado de diseño del sistema. Confirmar la ubicación de la fuga y reparar. Completar los procedimientos para probar la reparación y empezar con la operación del sistema.

➤ **Procedimiento en caso de fugas de gas "controladas" en plantas**

Retirar las fuentes inmediatas de ignición, ejemplo: prohibir fumar. Ventilar el o los edificios abriendo puertas y ventanas. Cuando sea posible, se deberá ventilar por a lo menos dos aperturas, por ejemplo, una ventana y una puerta. Las concentraciones atmosféricas deberán monitorearse en forma regular, especialmente los espacios altos con una mala circulación. Recordar que el periodo correcto de ventilación puede variar de unos minutos a períodos mucho más largos, como varias horas. Las mezclas con altas concentraciones de gas son un peligro potencial cuando comienzan a disminuir las concentraciones de gas.

Una vez logrado el acceso al edificio, controlado en forma inmediata la fuga de gas y asegurado la situación mediante la aislación del suministro de gas y la ventilación, las acciones posteriores deberán comprender, según sea necesario de:

- Pruebas de certeza para confirmar el "control" de la fuga de gas.
- Rastreo y reparación de fugas de gas.
- Prueba de certeza para confirmar la resolución del problema.
- Uso de un detector de gas para verificar que no entra gas al edificio desde el exterior.
- Probar conexiones que no se incluyeron en la prueba de certeza.

Si en la inspección no han detectado fuga de gas, verificar que el olor informado no sea causado por un derrame de productos de combustión desde algún artefacto.

4.5.4.7.3. PLAN DE EMERGENCIAS MÉDICAS

El MEDEVAC garantiza la prestación de un servicio médico oportuno y eficiente a las personas que lleguen a resultar afectadas en caso de un siniestro en la planta HVO por motivos de sus operaciones, se prestará los primeros auxilios y el soporte médico básico y en los centros médicos cercanos o especializados se prestará la atención especializada. A continuación, se detalla su procedimiento.

1. PROTOCOLO DE EMERGENCIAS MEDICAS

a) Recomendaciones generales

- Mantener la calma, no generar pánico ni propiciar rumores.
- Avisar rápidamente al jefe inmediato para activar el MEDEVAC.
- Identificar al Brigadista más cercano e informarle del siniestro.
- Identificar los sistemas de alarmas.
- Conocer la ubicación de los Botiquines, camillas y equipos para emergencia.
- Colaborar con las Brigadas, siguiendo las instrucciones de manera ordenada, sin interferir o retardando la acción.

Suministre la siguiente información:

- Nombre del lesionado (s), número de identificación (opcional), lugar donde se encuentre el lesionado (s). tipo de sangre. (opcional)
- Tipo de accidente: accidente de trabajo, intoxicación u otros. Estado del o los lesionados y la descripción de la lesión.

2. PROCEDIMIENTO OPERATIVO NORMALIZADO EN CASO DE EMERGENCIAS MEDICAS

Se establece procedimientos estándar de operación en caso de generarse lesiones en las personas.

Función del coordinador de brigada de primeros auxilios

- Recopila toda la información concerniente al incidente (gravedad, nombre del lesionado (s), número de identificación (Opcional), lugar donde se encuentre el lesionado (s), tipo de sangre. (Opcional), tipo de accidente (accidente de trabajo, intoxicación u otros), estado del o los lesionados, la descripción de la lesión, Número telefónico fijo y móvil.
- Informar al grupo de primeros auxilios.

Brigada o grupo de primeros auxilios:

- Activa y responde la alarma de manera tranquila y segura.
- Se identifica como Brigadista ante el paciente y las demás personas.
- Aplica permanentemente las normas de bioseguridad
- Alista y transporta el equipo, para atención del evento.

- Evaluación del área y del paciente
- Limitar riesgos para el auxiliador y para el paciente
- Atiende los lesionados, aplicando los conocimientos adquiridos durante su capacitación mientras llega el médico o si el caso lo requiere se desplaza con el paciente hasta el Centro de Atención Médica. Debe tener siempre en mente la premisa “lo que no sé hacer, no lo debo hacer”, con lo cual evitará complicaciones
- Clasifica los lesionados de acuerdo a la severidad de la lesión (triage).
- Apoya al Médico, no lo reemplaza.
- Colabora con entidades hospitalarias.
- Transportar al o a los pacientes en forma rápida y segura
- Coordinar una óptima atención de acuerdo a sus conocimientos.

4.5.4.7.4. PREPARACIÓN DE SIMULACROS

La realización del primer simulacro es el paso final del proceso de implementación del plan de emergencia, y la culminación de las tareas de información, difusión del plan y de la formación general del personal de la empresa y específica de las personas que integran los distintos equipos de intervención.

El resultado de los simulacros será proporcional al esfuerzo que se haya aplicado en esta fase de implementación. En simulacros posteriores, también será conveniente que antes del mismo se recuerde o refuerce la información de los procedimientos de actuación y la formación específica a todos los participantes, cuyo contenido dependerá del grado de entrenamiento y de la experiencia anterior en los simulacros que se hayan realizado en la planta.

✓ Información a los participantes

La primera vez se informará de manera abierta y generalizada del simulacro y el día y la hora en que se realizará, para evitar situaciones de sorpresa y que se considere que es una emergencia real. En simulacros posteriores, se irá restringiendo progresivamente la información a los empleados, ocultando la hora, posteriormente el día de la semana, hasta lograr que se mantenga una respuesta serena, organizada y eficaz ante una situación de emergencia.

A largo plazo, lo único que se sabrá es que hay que responder ante cualquier situación de alarma como si fuera real, con la tranquilidad de que – posiblemente – será un simulacro de emergencia. Se debe de tener en cuenta la posible presencia de personal externo ajeno a la empresa, ya sea personal ajeno que desarrolla actividades en la planta o visitas.

✓ **Definición del escenario**

Debe prestarse especial atención a la definición del “escenario” y debe planificarse detalladamente basado en las posibles situaciones de emergencia que se hayan identificado en la redacción del plan de mitigación de riesgos. Debe prepararse un “guion” que simule situaciones que pueden ocurrir realmente y que deberá incluir una secuencia de los horarios, objetivos, la relación de participantes, los recursos necesarios y los métodos de observación y evaluación. Es conveniente, siempre que sea posible, contar con el asesoramiento de los bomberos y, si es posible, desde el momento en que se decide la realización del simulacro.

✓ **Etapas de desarrollo**

Previamente al simulacro

Fijar la fecha y la hora del simulacro y definir el tipo y magnitud del simulacro, que condicionará el nivel de activación y las necesidades de los equipos participantes y materiales. Inventariar de los recursos humanos y materiales a involucrar e informar a todo el personal de la realización del simulacro, para evitar conductas inadecuadas (según la amplitud de información conveniente: general, restringida, mínima, ninguna). Si se prevé la participación de personas o instituciones ajenas, tales como bomberos, hospitales y ambulancias, deben estar al tanto de la información del simulacro. Verificar previamente las condiciones adecuadas de las instalaciones y de la señalización e iluminación de emergencia de los recorridos de evacuación. Prever la información a las autoridades competentes oportunas, a las empresas próximas, a los vecinos y a los medios de comunicación, en el caso de que el simulacro sea público o pueda ser presenciado por personas ajenas a la empresa. Designar el lugar y la persona que inicia el simulacro. Designar y formar a los observadores/controladores en las distintas zonas.

El mismo día del simulacro

Preparar del “escenario” del simulacro. Reunión preparatoria previa al simulacro con el coordinador del simulacro junto a los observadores/controladores, para concretar las funciones de cada uno de ellos en la realización del simulacro. Prevenir posibles accidentes durante el simulacro (por ejemplo, golpes o caídas) y disponer de primeros auxilios. Realizar el simulacro, con la anotación de las acciones desarrolladas por los participantes y la hora en que se realizan, con la indicación de las posibles incidencias. Tras la finalización del simulacro, reunión posterior de los responsables de la emergencia y los observadores/controladores para redactar el informe de la actuación de los participantes y las

conclusiones y propuestas de mejora deducidas del mismo. Informar a los empleados del resultado del simulacro y conclusiones del mismo.

✓ **Observadores**

Como se pretende conocer y evaluar si las personas que deben actuar lo hacen correctamente, es necesario designar observadores o controladores. Éstos registrarán, por escrito, todos los sucesos que ocurren en su zona de observación, describiendo las acciones que llevan a cabo las personas que se encuentran en la misma, pudiendo utilizar si es posible la captación de imágenes (por ejemplo, para constatar el colapso de vías de evacuación o detectando personal circulando en contra dirección). Para facilitar dicho registro y obtener la mayor información posible, se utilizan unas hojas de registro preparadas con antelación.

4.5.4.8. Control del Desempeño y Registros

Toda actividad relacionada con el programa seguridad y salud ocupacional quedará registrada en su respectivo formulario y archivada para su revisión. Se implementará un sistema de control para el desempeño y cumplimiento en la gestión de seguridad y salud ocupacional. Mensualmente se evaluará el cumplimiento de las actividades personalizadas del Programa de Seguridad y Salud Ocupacional.

4.5.4.9 Investigación de Incidentes

Todos los incidentes serán investigados y analizados, se tomarán las medidas correctivas y se hará seguimiento a su cumplimiento. Además, serán dados a conocer al personal. La investigación se hará de acuerdo al procedimiento de investigación de incidentes. Informe Técnico de Investigación Todos los accidentes con daño a las personas y la propiedad potencialmente graves serán investigados por la persona designada. Reporte de los Incidentes todos los incidentes serán reportados en los formularios establecidos para cada estamento. Alerta de Peligro, cada vez que ocurra un accidente se publicará en los lugares de trabajo y se dará a conocer a los trabajadores un resumen de él, para que sea conocido por todos y sirva de enseñanza para evitar el mismo error.

4.10 Auditorías

Se elaborará un programa de auditorías internas y externas para evaluar la gestión en materias de Seguridad y Salud Ocupacional, siendo las externas coordinadas con el departamento de Seguridad.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. CONCLUSIONES

- ✓ En este proyecto se realizó un análisis de riesgos predictivo en la nueva planta de biodiesel dentro del proceso HVO, aplicando inteligencia artificial dentro de la refinería Guillermo Elder Bell. Con las investigaciones realizadas en este trabajo se exponen las variables de operación, tecnología, materia prima, reacciones de conversión y equipos del proceso de hidrotratamiento de aceites vegetales.
- ✓ En este proyecto se elaboró matrices de riesgos IPERC de cada área operativa utilizando la norma GTC 45, para respaldar los resultados mediante el método cuantitativo previamente se realizó un análisis cualitativo con el método HAZOP. Quedan propuestas las zonas de riesgo alto, medio y bajo juntamente con sus medidas de intervención.
- ✓ En la ingeniería de este proyecto se aplicó la inteligencia artificial para el modelado de un programa predictivo de las consecuencias de una explosión por fuga de hidrogeno gaseoso utilizando el software Matlab generando una base de datos con la técnica TNT equivalente.
- ✓ Se realizo un programa de mitigación de riesgos basado en los resultados de los análisis de riesgos realizados en la planta HVO. Este programa cuenta con la forma de actuación ante un siniestro, además, propone planes de contingencia y emergencia.
- ✓ Se estimo el impacto económico financiero utilizando la relación costo beneficio para el cual se expuso los costos de desarrollo del programa propuesto y su implementación, además de las ventajas que tiene sobre los métodos tradicionales de análisis de riesgos.

5.2. RECOMENDACIONES.

- ✓ Se recomienda construir un diagrama P&ID (diagrama de flujo de proceso o de tuberías e instrumentación) debido a que es el soporte principal para un análisis de riesgos, pues mencionado análisis consiste en identificar riesgos, sus orígenes, sus consecuencias y su mitigación.
- ✓ Se sugiere que la información para la programación de modelos predictivos con inteligencia artificial sea detallada y de alta calidad la información es decir los datos tienen que provenir de una fuente confiable. Para obtener resultados certeros mediante IA se recomienda tener acceso a las lecturas directamente sensores de medición de presión y temperatura entre otros.
- ✓ Se recomienda involucrar a expertos en el diseño de plantas para determinar los límites de seguridad para cada área operativa para determinar con mayor precisión los peligros de alto riesgo además de re plantear las medidas de actuación ante accidentes.
- ✓ Se aconseja usar la inteligencia artificial para la identificación de patrones en los datos detectados por sensores, monitorizar variables en tiempo real y guiar a los operadores hacia los escenarios adecuados para prevenir los riesgos.
- ✓ Se recomienda involucrar a expertos en seguridad industrial para replantear un nuevo plan de mitigación de riesgos pasado cierto tiempo y evaluar el nivel de seguridad de su plan de mitigación actual.

BIBLIOGRAFÍA

- Abi.bo, (12 de enero 2023) “presidente dará la orden de proceder a la fabricación de equipos para la planta de biodiésel”. <https://www.abi.bo/index.php/component/content/article/36-notas/noticias/economia/26938-presidente-dara-la-orden-de-proceder-a-la-fabricacion-de-equipos-para-la-planta-de-biodiesel?Itemid=101>
- Álogos. (9 de julio de 2018). Introducción a Machine Learning. Obtenido de Álogos: <http://alogs.es/introduccion-machine-learning/>
- Alvarez-Majmutov A., Jorge Ancheyta, Alexis Tirado. (2022). *Modeling and simulation of a multi-bed industrial reactor for renewable diesel hydroprocessing*.
- Apte, C. (2010). The Role of Machine Learning in Business Optimization.
- Bagnato, J. I. (11 de septiembre de 2017). 7 pasos del Machine Learning para construir tu máquina. Obtenido de Aprender Machine Learning: <http://www.aprendemachinelearning.com/7-pasos-machine-learning-construir-maquina/>
- Batista Marcelo S., Santiago Elisabete I., Assaf Elisabete M., Ticianelli Edson A., (2005) Evaluation of the water-gas shift and CO methanation processes for purification of reformat gases and the coupling a PEM fuel cell system. *Journal of Power Sources*, 145, pp. 50-54.
- Blend Stock for Destillate Fuels. (2002). In *ASTM, ASTM D-6751-02 Standard Specification for Biodiesel Fuel (B100)*.
- Chollet, F. (2017). Deep Learning with Python. MANNING. Obtenido de <https://www.manning.com/books/deep-learning-with-python>
- Cavalcanti Cláudia J.S., Mauro A.S.S. Ravagnani, Luiz Stragevitca, Florival R. Carvalho, Maria Fernanda Pimentel. (2022). *Simulation of the soybean oil hydrotreating process for green diesel production*.
- De Gracia Storch y Tomás García Martín, J. M. ^a. S. (2008). *SEGURIDAD INDUSTRIAL EN PLANTAS QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS Fundamentos, evaluación de riesgos y diseño*.
- Diaz Alonzo Fernando, (2006), “Análisis de Consecuencias y zonas de planificación para explosiones industriales accidentales”
- Demirbas, A. (2008). *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. Londres, Inglaterra: Springer.
- Donnis, B., Egeberg, R., Blom, P., & Knudsen, K. (2009). Hydroprocessing fo bio-oil and oxygenates to hydrocarbons. Understandign the reaction routes. *Topics in Catalysis*, 52, 229–240.

- El Deber, (12 de septiembre de 2022), Planta de diésel renovable sigue en etapa de evaluación, pero la ANH anticipa una producción de 9.000 barriles por día. <https://eldeber.com.bo/economia/planta-de-diesel-renovable-sigue-en-etapa-de-evaluacion-pero-la-anh-anticipa-una-produccion-de-9000-233938>
- Esteve, J. (11 de Julio de 2017). Introducción al Machine Learning. Obtenido de LinkedIn SlideShare: <https://es.slideshare.net/JavierEsteveMeli/introduccion-al-machine-learning-77766343>
- Fingas, M. (2002). *Handbook of Hazardous Materials Spills Technology*". New York: Mc Graw Hill.
- Freedman, F. H. (1986). Variables affecting the yields of fatty esters from Transesterified vegetable oils *Journal of the American Oil Chemists Society*. *Journal of the American Oil Chemists Society, Ibid, 61*, 1638–1643.
- Fukuda, H., & Noda, K. A. (2001). Biodiesel fuel production by Transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengi-Neering*, (92), 405–416.
- González, L. (23 de marzo de 2018). Aprendizaje No Supervisado: K-Means Clustering. Obtenido de Aprender todo sobre inteligencia artificial: <http://ligdigonzalez.com/aprendizaje-nosupervisado-k-means-clustering/>
- Graca, I., Lopes, J. M., Cerqueira, H. S., & Ribeiro, M. F. (2012). Bio-oils upgrading for second generation biofuels. *Ind. Eng. Chem. Res*, 52, 275–287.
- GTC 45. Guía para la identificación de los peligros y la valoración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional. (2011). *British Petroleum - Statistical Review of World Energy*.
- Hernández-Loyo, S.-B. T.-Z. &. (2012). *Hydroconversion of Triglycerides into Green Liquid Fuels*.
- Honkela, M., Viljava, T., Gutierrez, A., & Krause, O. (2010). *Hydrotreating for Bio-Oil Upgrading. En M. Crocker, Thermochemical Conversion of Biomass to Liquid Fuels and Chemicals*. 532.
- Hozz, (2015) Teoría del modelo PSO - Machine Learning For Beginners.
- Huber, G., Oconnor, P., & Corma, A. (2007). Processing biomass in conventional oil refineries: production of high quality diesel by hydrotreating vegetable oils in heavy vacuum oil mixtures. *Applied Catalysis*, 120–129.
- IBCE, (1 de enero de 2022) Bolivia: Importaciones de diésel, <https://ibce.org.bo/publicaciones-ibce-cifras-pdf.php?id=859>
- Jeczminek, L., & Porzycka-Semczuk, K. (2014). Hydrodeoxygenation, decarboxylation and decarbonylation reactions while coprocessing vegetable oils over a NiMo hydrotreatment catalyst. Part I: Thermal effects - Theoretical considerations. *Fuel*, 131, 1–5.

- Kagan, J. (2010). *The petro-chemical company uses its core competency to expand into biofuels. UOP: An Unlikely Cleantech Leader.*
- Kalnes, T., McCall, M., & Shonnard, D. (2010). *Renewable Diesel and Jet-Fuel Production from Fats and Oils. En M. Crocker, Thermochemical Conversion of Biomass to Liquid Fuels and Chemi-cals.* 532.
- Korsten, H., Hoffmann, U. (1996). Three Phase Reactor Model for Hydrotreating in Pilot Trickle-bed Reactors. *AIChE Journal* 42, pp. 1350-1360
- Kubicka, D., Simacek, P., & Zilkova, N. (2009). Transformation of vegetable oils into hydrocarbons over mesoporous-alumina-supported CoMo catalysts. *Topics in Catalysis*, 52, 229–240.
- La Razón, (1 de enero de 2023), Hasta septiembre llegarán los equipos para emplazar la Planta de Biodiesel en Santa Cruz. <https://www.la-razon.com/economia/2023/07/02/hasta-septiembre-llegaran-los-equipos-para-emplazar-la-planta-de-biodiesel-en-santa-cruz/>
- Liu, Y., Sotelo-Boyás, R., Murata, K., Minowa, T., & Sakanishi, K. (2011). Hydrotreatment of Vegetable Oils to Produce Bio-Hydrogenated Diesel and Liquefied Petroleum Gas Fuel over Catalysts Containing Sulfidated Ni-Mo and Solid Acids. *Energy&Fuels*, 4675-4685.
- Ma, F., Milford, & Hanna, A. (1999). Biodiesel production: A review, *Tetrahedron Letters. Biore-source Technology*, 70, 1–15.
- Management Solutions España. (2018). Machine Learning, una pieza clave en la transformación de los modelos de negocio
- Martínez, J. (21 de diciembre de 2018). Fases del Proceso de Machine Learning. Obtenido de IArtificial.net: <https://iartificial.net/fases-del-proceso-de-machine-learning/>
- Moreno Fernández-Villamil, J., Hurtado de Mendoza Paniagua, A. (2018), “Preliminary design of the green diesel production process by hydrotreatment of vegetable oils”, Polytechnic University of Madrid (ETSII)
- Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas. (2008).
- Oil, N. (2012). Neste oil, *NExBTL® Renewable Diesel Singapore Plant.*
- Reyes, C. G. (2011). *Análisis De Los Modelos Matemáticos Para La Evaluación De Consecuencias Por Derrames, Fugas, Explosiones E Incendios Provocados Por Desastres Químicos.* UNAM.
- Rios, G. (2002). Historia de los motores de combustión interna”. *Revista Facultad De Ingeniería* #, 26.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2010). *Artificial Intelligence: A Modern Approach.* Prentice Hall

- Sánchez, M. (24 de enero de 2019). ¿Cómo hacer que tu proyecto de Machine Learning tenga éxito? Obtenido de mc.ai: <https://mc.ai/como-hacer-que-tu-proyecto-de-machine-learning-ten-gaexito/>
- Santana, C. (16 de diciembre de 2017). Regresión Lineal y Mínimos Cuadrados Ordinarios. Obtenido de Canal de YouTube de DotCSV: https://www.youtube.com/watch?v=k964_uNn310
- Satterfield, C. N. (1975). Trickle-bed reactors. *AIChE Journal*, 21, 209–228.
- Scherzer, J., & Gruia, A. J. (1996). *Hydrocracking Science and Technology*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Shalev-Shwartz, S., & Ben-David, S. (2014). *Understanding machine learning: from theory to algorithms*. Nueva York: Cambridge University press.
- Sotelo-Boyás, R., Liu, Y., & Minowa, T. (2008). *Comparación de Métodos de Producción de Biodiésel de Primera y Segunda Generación a partir de Aceite de Jatropha*.
- Uribe Gómez, M. (2010). *Simulación de una planta piloto para la producción de Biodiésel en el laboratorio de operaciones unitarias de la ESIQIE, Tesis, Ingeniería Química Industrial, Instituto Politécnico Nacional*. México D.F.
- Veriansyah, B., Han, J., Kim, S., Hong, S., Kim, Y., Lim, J., & Kim. (2011). Production of Renewable Diesel by Hydroprocessing of Soybean Oil: Effect of Catalyst. *Fuel*, 578–585.
- Velogig. (28 de septiembre de 2018). ¿Qué es el Machine Learning y cómo es su proceso? Obtenido de VELOGIG Marketing Científico: <https://velogig.com/que-es-el-machine-learning-y-comoes-su-proceso/>
- (2012). *Biodiesel Production Safety*, https://youtu.be/AjHh0b6_3c
- (2013). *Virtual Tour: Renewable Diesel Reactor*, <https://youtu.be/kwRCzhRnAP8>
- (2021). *Bolivia será el primer país en Sudamérica en producir y utilizar diésel renovable de alta calidad*, <https://youtu.be/rtEB4vNwyW0>
- (2021). *Foro Virtual: Biodiésel ¿una alternativa para Bolivia*, https://youtu.be/x3B8pd_wKfk
- (2022). *Bolivia apuesta por 3 Plantas Oleaginosas para Producir Biodiésel y reducir Importaciones*, https://youtu.be/OR_JiB0vO2U
- (2022). *Bolivia proyecta biodiesel como combustible II, con el Ing. Roque Aguilera*, <https://youtu.be/RBNEt35ubvc>
- (2022). *Bolivia proyecta biodiesel como combustible, invitado: Ing. Roque Aguilera*, <https://youtu.be/097wEGDL3dQ>
- (2022). *YPFB PROYECTA PLANTA TIPO FAME PARA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL*, <https://youtu.be/097wEGDL3dQ>

ANEXOS

MODELO DE MATRIZ DE RIESGOS SEGÚN LA NORMA GTC 45

Anexo 1:

TIPO DE ACTIVIDAD	EVALUACIÓN INICIAL		CONTROL DE RIESGOS	EVALUACIÓN FINAL	
	PROBABILIDAD			PROBABILIDAD	
	ÍNDICE DE SEVERIDAD (S)	ÍNDICE DE PROBABILIDAD (P)		ÍNDICE DE SEVERIDAD (S)	ÍNDICE DE PROBABILIDAD (P)
DESCRIPCIÓN DE LA TAREA O ACTIVIDAD	NR: NIVEL DE RIESGO (IT-IM-M-TO-TR)	RIESGO = P x S	EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL	NR: NIVEL DE RIESGO (IT-IM-M-TO-TR)	RIESGO = P x S
	RIESGO = P x S	RIESGO = P x S		RIESGO = P x S	RIESGO = P x S
PUESTO DE TRABAJO	ÍNDICE DE EXPOSICIÓN AL RIESGO (D)	ÍNDICE DE CAPACITACIÓN(C)	CONTROL ADMINISTRATIVOS	ÍNDICE DE EXPOSICIÓN AL RIESGO (D)	ÍNDICE DE CAPACITACIÓN (C)
	ÍNDICE DE PERSONAS EXPUESTAS (A)	ÍNDICE DE PROCEDIMIENTOS EXIS-	CONTROLES DE INGENIERÍA	ÍNDICE DE PROCEDIMIENTOS EXISTENTES (B)	ÍNDICE DE PROCEDIMIENTOS EXISTENTES (B)
PROCESO	LESIÓN	REQUISITO LEGAL	SUSTITUCIÓN	ÍNDICE DE PERSONAS EXPUESTAS (A)	ÍNDICE DE PERSONAS EXPUESTAS (A)
	REQUISITO LEGAL	REQUISITO LEGAL	ELIMINACIÓN	RIESGO = P x S	RIESGO = P x S
PELIGRO	TIPO DE PELIGRO	TIPO DE PELIGRO	ELIMINACIÓN	RIESGO = P x S	RIESGO = P x S
	PELIGRO	PELIGRO	ELIMINACIÓN	RIESGO = P x S	RIESGO = P x S
NO RUTINARIA (NR)	NO RUTINARIA (NR)	NO RUTINARIA (NR)	ELIMINACIÓN	RIESGO = P x S	RIESGO = P x S
	NO RUTINARIA (NR)	NO RUTINARIA (NR)	ELIMINACIÓN	RIESGO = P x S	RIESGO = P x S
RUTINARIA (R)	RUTINARIA (R)	RUTINARIA (R)	ELIMINACIÓN	RIESGO = P x S	RIESGO = P x S
RUTINARIA (R)	RUTINARIA (R)	RUTINARIA (R)	ELIMINACIÓN	RIESGO = P x S	RIESGO = P x S

Anexo 2: Código del programa de la red neuronal

```
function [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.
%
% Auto-generated by MATLAB, 15-Jun-2023 09:05:16.
%
% [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1) takes these arguments:
% x = Qx3 matrix, input #1
% and returns:
% y = Qx1 matrix, output #1
% where Q is the number of samples.
%#ok<*RPMT0>
% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====

% Input 1
x1_step1.xoffset = [1;0.038232004;3.71391e-05];
x1_step1.gain = [0.0002000200020002;0.00523174259258938;0.00218676391636176];
x1_step1.ymin = -1;

% Layer 1
b1 = [-2.3311670443704803901;1.0971089198274621701;-0.22661666716003717181;-
1.094004417161222209;5.7535406986682264829];
IW1_1 = [1.6130663654840045051 1.79464652139298253 0.29475357656479284074;-2.043988647135923209 -
0.27652416446658384386 -0.72071758791710427428;-1.0049289690931044738 1.6943254353409666901 -
1.7698437599711840384;-1.6688570968343106049 1.4692787526293156208
1.0751149092636005378;1.9216583732373635485 3.8405085305284725194 -0.41337230107972677828];

% Layer 2
b2 = 0.47090402492354876962;
LW2_1 = [-0.46966674055718360403 -0.50482148648432423332 0.687987379070471472 -
1.2642231218952542093 -3.3432127889376790364];

% Output 1
y1_step1.ymin = -1;
y1_step1.gain = 1;
y1_step1.xoffset = 1;

% ===== SIMULATION =====
% Dimensions
Q = size(x1,1); % samples
```

```

% Input 1
x1 = x1';
xp1 = mapminmax_apply(x1,x1_step1);

% Layer 1
a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*xp1);

% Layer 2
a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;

% Output 1
y1 = mapminmax_reverse(a2,y1_step1);
y1 = y1';
end

```

```

% ===== MODULE FUNCTIONS =====

```

```

% Map Minimum and Maximum Input Processing Function

```

```

function y = mapminmax_apply(x,settings)
y = bsxfun(@minus,x,settings.xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings.gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings.ymin);
end

```

```

% Sigmoid Symmetric Transfer Function

```

```

function a = tansig_apply(n,~)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end

```

```

% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function

```

```

function x = mapminmax_reverse(y,settings)
x = bsxfun(@minus,y,settings.ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings.gain);
x = bsxfun(@plus,x,settings.xoffset);
end

```

Correo: ninasanchezmargarita1994z@gmail.com

Celular: 63183674



2 0 2 3 - T T E S - 9 0 7 - 0 - 1

DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-2215/2023
La Paz, 16 de Agosto del 2023

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha 9 de Agosto del 2023, por MARGARITA DEL ROSARIO NINA SANCHEZ con C.I. N° 9109203 LP, con número de trámite DA 1147/2023, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: "ANÁLISIS PREDICTIVO DE RIESGOS EN LA PLANTA DE BIO DIÉSEL HVO DE LA REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL, APLICANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL COMPUTACIONAL", cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el "Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración".

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece "Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: "la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios".

"2023 AÑO DE LA JUVENTUD HACIA EL BICENTENARIO"

Oficina Central - La Paz
Av. Montes, N° 515,
entre Esq. Uruguay y
C. Batallón Himani.
Telfs.: 2155700 - 2159276
2159251 Fax: 2155700

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijarro,
N° 29, Edif. Bicentenario.
Telfs.: 312752 - 72002936

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, N° 737,
entre 16 de Julio y Antezana.
Telfs.: 4440403 - 72002957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. Multifuncion El Ceibo
Ltda. Piso 2, Of. 58,
zona 16 de Julio.
Telfs.: 2144001 - 72003020

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 2, N° 366
Casí esq. Urrutagolitia,
zona Parque Bolívar.
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calles Oro Trigo y Avarna
Edif. Santa Clara, N° 243.
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre,
N° 5837, entre Ayacucho
y Jumin, Galería Central,
Of. 14 (Ex Banco Fie).
Telf.: 6720388

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. AM. Salinas N° 242,
Primer Piso, Of. 11.



Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley Nº 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: "...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial".

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: "... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

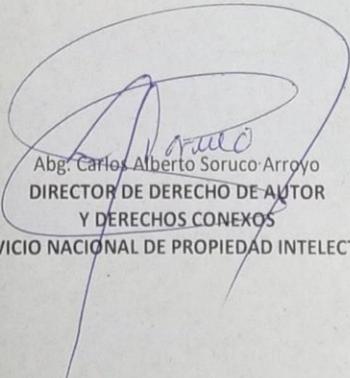
POR TANTO

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin Ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: "**ANÁLISIS PREDICTIVO DE RIESGOS EN LA PLANTA DE BIO DIÉSEL HVO DE LA REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL, APLICANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL COMPUTACIONAL**", a favor de la autora y titular: **MARGARITA DEL ROSARIO NINA SANCHEZ con C.I. Nº 9109203 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.



Abg. Carlos Alberto Soruco Arroyo
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS**
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL

CASA/mnct
c.c.Arch.



"2023 AÑO DE LA JUVENTUD HACIA EL BICENTENARIO"

Oficina Central - La Paz
Av. Montes, Nº 515,
entre Esq. Uruguay y
C. Batallón Illimani.
Tells.: 2195700 - 2195276
2195251 Fax: 2195700

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijarro,
Nº 29, Edif. Bicentenario.
Tells.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, Nº 737,
entre 16 de Julio y Antezana.
Tells.: 4441403 - 72042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, Nº 2560
Edif. Multicentro El Ceibo
Edif. Piso 2, Of. 5B,
zona 16 de Julio.
Tells.: 2141001 - 72042929

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 7, Nº 366
casi esq. Urmilagallita,
zona Parque Bolívar.
Tells.: 72095873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calles Ciro Trigo y Avaroa
Edif. Santa Clara, Nº 243.
Tells.: 72015286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre,
Nº 5837, entre Ayacucho
y Jumin, Galería Central,
Of. 14 (Ex Banco Fie).
Tells.: 6720288

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. AM. Salinas Nº 242,
Primer Piso, Of. 17.